

Pochodzenie życia –
wyjątkowy akt samoródtwa?

UNIWERSYTET IM. ADAMA MICKIEWICZA W POZNANIU

Edward Chwieduk

Pochodzenie życia – wyjątkowy akt samoródtwa?



POZNAŃ 2011

Recenzent: prof. dr hab. Jerzy Trammer

© Edward Chwieduk 2011
This edition © Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań 2011

Projekt okładki: Edward Chwieduk

Redaktor: Katarzyna Muzia

Redaktor techniczny: Elżbieta Rygielska

Łamanie komputerowe: Eugeniusz Strykowski

ISBN 978-83-232-2349-8

WYDAWNICTWO NAUKOWE UNIwersytetu IM. ADAMA MICKIEWICZA W POZNANIU
61-701 POZNAŃ, UL. FREDRY 10
www.press.amu.edu.pl

Sekretariat: tel. 61 829 46 46, faks 61 829 46 47, e-mail: wyd nauk@amu.edu.pl
Dział sprzedaży: tel. 61 829 46 40, e-mail: press@amu.edu.pl

Wydanie I. Ark. wyd. 11,00. Ark. druk. 9,5.

Druk i oprawa: UNI-DRUK s.j., LUBOŃ, UL. PRZEMYSŁOWA 13

SPIS TREŚCI

Przedmowa	7
Wprowadzenie	9
Czym jest życie?	19
Historia poglądów	21
Definicje życia	29
Zanim „życie” zmieniło świat	31
Dzieje wody na Ziemi	35
Rodowód ziemskiej atmosfery	39
Ziemska pracownia	48
Gdzie eksperymentowała „laborantka” Ziemia?	48
Kiedy „laborantka” Ziemia ożywiła swoją działalność?	50
Właściwości żywej materii	53
Imperium życia	53
Hierarchia struktury komórki	61
Martwe początki organizmów żywych	64
Potęga biomolekuł	64
Synteza cząsteczek budulcowych	65
Nieograniczone możliwości architektoniczne – polimeryzacja	74
Oligo- i polipeptydy	75
Katalizatory	78
Nukleotydy i kwasy nukleinowe	81
Lipidy, błony komórkowe	87
Potęga makrocząsteczek	91
Hipotezy białkowe	92
Hipotezy genowe	94
Życiowe strategie organizmów żywych	106
Oddychanie – strategia wydajna, ale nie suwerenna	111
Fermentacja (oddychanie beztlenowe)	112
Oddychanie tlenowe (komórkowe)	114
Pełna autonomia	116

Władcy Ziemi	118
Style życia	119
Bakterie i sinice	123
Archeany (archebakterie)	126
Eukarionty	128
Wielokomórkowce	133
Tkankowce (Metazoa)	136
Fauna z Ediacara	137
Bibliografia	143

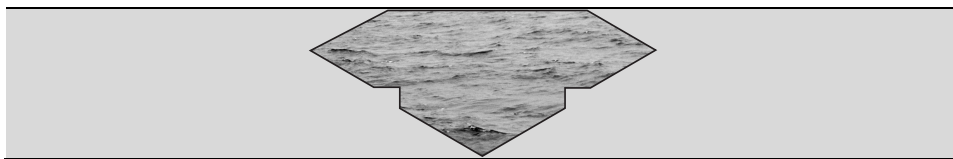
PRZEDMOWA

Życie na Ziemi nie pojawiło się nagle. Jego powstanie polegało na długich i żmudnych próbnym procesach, które badacze określają jako ewolucję chemiczną i biochemiczną, poprzedzających ewolucję biologiczną. Ale nie to czyni życie wyjątkowym zdarzeniem w skali wszechświata, przynajmniej takiego, jaki zdążyła poznać do tej pory ludzkość. Chyba najbardziej fascynujący jest fakt, że życie narodziło się jakby samo, i to z form w istocie swej nieożywionych! Życie byłoby zatem wyjątkowym aktem samoródtwa.

Pojęcie samoródtwa ma własną historię i definicję, o czym napiszę w dalszej części pracy. W tym miejscu chciałbym jedynie zaznaczyć, że ów „akt samopowstawania życia” zostanie przedstawiony tylko w jednej perspektywie poznawczej, mianowicie naukowej. O ziemskim rodowodzie życia wydają się świadczyć zarówno odkrycia fizyków, chemików, jak i biologów. Nie bez znaczenia jest też materiał dowodowy dostarczany przez paleontologów, których głos tu reprezentuję. Zatem problem, czym jest życie na Ziemi i jak doszło do jego zawiązania, stanowi interdyscyplinarne wyzwanie, w którym współlistnieją już liczne i zawiłe wątki wiedzy. Fragmenty odpowiedzi zebrane w niniejszym tekście stanowią raczej ich syntezę aniżeli skrupulatną analizę, która z pewnością przekroczyłaby skromną objętość tej pozycji. Tekst ten kieruję głównie do studentów geologii. Ich ciekawość poruszanej tu problematyki stała się dla mnie główną inspiracją i zachętą do przygotowania tej publikacji.

Mam świadomość, że nauka nie jest jedynym punktem odniesienia dla sensów, jakich życie dostarcza współczesnemu czytelnikowi. To, co może go przekonać do owej wąskiej perspektywy szkiełka i oka, tkwi być może w jej otwartości na życie właśnie, a tym samym w gotowości do zmiany sądów na jego temat. Przyjęte w niniejszym tekście spojrzenie na zagadkę ży-

cia nie konkuruje ani z wiarą, ani z niewiarą w to, jak mogło dojść do powstania wszelkiego stworzenia. Jest raczej rekapitulacją tego, co podpowiadał badaczom ich zmysł obserwacji dostępnego im świata oraz stosowanie zasad logiki. Bo czy tego chcemy, czy nie, w naszym kręgu kulturowym nauka stała się jednym ze sposobów opisu świata i właśnie odwołując się do niego, zapraszam do lektury tej książki.



WPROWADZENIE

W komórce nie ma nic żywego oprócz całej komórki.

LUCIEN CUÉNOT¹

Według Arystotelesa w naturę człowieka wpisane jest zadawanie pytań. Trudno nie zgodzić się z tą myślą, zwłaszcza jeśli odwołamy się do naszej życiowej praktyki, zmysłu obserwacji i chęci zaspokajania wrodzonej ciekawości. Pytania pobudzają nas do refleksji nad rzeczywistością, sensem istnienia oraz prowokują do działania. Wiedzeni dociekliwością szukamy związków przyczynowo-skutkowych w otaczających nas zjawiskach. W ten sposób tworzymy na ich temat różne wyobrażenia, które przybierają postacie: mitu, koncepcji, modelu, teorii i wreszcie prawa. W tym kontekście warto zwrócić się ku kwestii, która od dawna nurtuje ludzi z euroatlantyckiego kręgu kulturowego² i dotyczy początków życia na Ziemi. Niestety, na drodze poszukiwań satysfakcjonującej nas odpowiedzi pojawia się poważny problem: nie zachowały się pierwsze organizmy – milczący świadkowie

¹ Francuski genetyk i zoolog (1866–1951); m.in. potwierdził na materiale zwierzęcym słuszność praw Mendla.

² W tym kręgu kulturowym rozwinęła się nauka jako jeden ze sposobów poznawania świata. System ten wytworzył procedury myślenia pozwalające na weryfikację sformułowanych w języku logiki pytań. To dlatego można powiedzieć, że kwestia początków życia na ziemi nas „nurtuje”. Nie należy jednak pytań naukowych dotyczących życia utożsamiać ze specyficznymi konstruktami myślowymi, jakimi są mity obecne w kulturach wielu ludów lub, co gorsze, traktować je jako wczesne „stadium” ludzkiego myślenia, którego zwieńczeniem jest nauka. Człowiek Zachodu w mitach innych kultur dostrzegał odbicie własnych dylematów, związanych z pytaniami o początki istnienia i sens świata. Tymczasem, jako takie, stanowią one rodzaj światopoglądu, który nie może być porównywany do naukowego procesu odkrywania świata typowego dla naszego kręgu kulturowego.

powstania życia na naszej planecie. Najstarsze skamieniałości, domniemane heterotroficzne bakterie, datowane na 3,5 mld lat, reprezentują już tak rozmaitą i zaawansowaną organizację komórkową, że nie sposób uznać ich za pierwsze formy życia, które musiały przecież powstać znacznie wcześniej. A jeśli tak, to trudno nie spytać także o czas: Jak wcześnie zawiązało się życie? Próba odpowiedzi na to pytanie rodzi kolejne wątpliwości. Gdzie pojawiły się owe najprostsze formy przejawiające cechy życia? Jak doszło do ich powstania? I wreszcie, czy życie mogło zrodzić się na Ziemi? Niestety, uzyskiwane odpowiedzi często nas nie zadowalają, gdyż są po prostu nieprecyzyjne. Najczęściej słyszymy, że życie „pojawiło się dość dawno, gdzieś w prekambrze”, to znaczy już na początku historii Ziemi, w „sprzyjających okolicznościach” (cokolwiek to znaczy). Czy zatem możliwe jest dokładniejsze określenie czasu, miejsca i niezbędnych warunków fizykochemicznych koniecznych do zapoczątkowania historii świata ożywionego?

Jak się okazuje, w dużej mierze – tak! Naukowcy w poszukiwaniu odpowiedzi nie raz tworzyli fascynujące hipotezy i finezyjne eksperymenty, wśród których zdarzały się też i te z pogranicza magii i mitu. Jak się okaże w dalszej części pracy, którą kieruję do czytelników pragnących uporządkować rozsypane strony księgi o początkach życia na Ziemi i wyjaśnić choćby częściowo zasugerowane wątpliwości, „tajemne siły” nie miały w tej kwestii nic do zdziałania. Jeśli przyjrzeć się bowiem dorobkowi naukowemu: biologów, fizyków, chemików, paleontologów, można określić, w pewnym przybliżeniu, czas, charakter miejsca i warunki prowadzące do powstania świata organicznego. Ten splot zdarzeń nazwałem tu „wyjątkowym aktem samoródtwa”. Mówi on o tym, w jaki sposób ziemska nieorganiczna materia zmieniała się w organiczne cegielki pierwszych prakomórek, jak ukształtowała się sama, bez żadnej tajemniczej siły czy materialnej pomocy z zewnątrz – mam tu na myśli koncepcję „zarażenia” Ziemi materią organiczną z kosmosu, i jak zaczęła przejawiać cechy struktur, o których mówimy, że są żywe. Przypadek narodzin życia, choć trudny do ostatecznego sprecyzowania, nie jest zatem niemożliwy do opisanego i zrozumienia.

Punktem wyjścia w moich rozważaniach są: obserwacja świata organicznego, z której wynika, że potomkowie są podobni do przodków, oraz ewolucyjna koncepcja Darwina, zgodnie z którą przyjmujemy, że protoplaszczyci odznaczałi się mniej złożoną budową niż ich następcy³. Zważywszy na

³ Wyjątkowe pod tym względem pasożyty, wbrew niektórym opiniom, nie dowodzą, że ewolucja zatrzymuje się lub zawraca. Pasożyty jelitowe, podawane nierzadko jako przykład ewolucji regresywnej, de facto są bardzo wyspecjalizowanymi organizmami, które tę specjalizację nabyły w wyniku ewolucji progresywnej; uproszczona budowa lub zanik niektórych układów w tej grupie organizmów są wtórnymi cechami przystosowawczymi, powstałymi w wyniku ewolucji biologicznej.

fakt, że cały współczesny świat organiczny zawiera pewne wspólne cechy (fundamenty), mamy prawo sądzić, że pierwsza komórka musiała już zawierać podstawowe cegiełki (biomolekuły) świadczące o jedności dzisiejszego świata ożywionego. Można tak twierdzić nawet wówczas, gdy z każdej linii ewolucyjnej prowadzącej do prakomórki znikły najbardziej prymitywne właściwości. W dalszej części tekstu postaram się także wykazać, że „akt samoródtwa” to nie tylko scalenie się owych cegiełek prakomórki, ale ich współdziałanie w konsekwencji prowadzące do wytworzenia się układu wykazującego wielce spotęgowaną zdolność przetrwania.

Chcąc ułatwić czytelnikowi umiejscowienie opisywanych zdarzeń na osi czasu, posłużę się analogią, odwzorowując najważniejsze wydarzenia naszej planety w skali jednego roku (365 dni; ryc. 1). Na pierwsze dni stycznia w tym modelu przypada formowanie się Ziemi (4,567 mld lat temu), natomiast ostatnie sekundy(!) grudnia odpowiadają czasom historycznym. W każdej minucie naszego czasu w tym modelu zawiera się 8689 lat czasu rzeczywistego z istnienia Ziemi, czyli mniej więcej tyle, ile upłynęło go od powstania pierwszych miast, dających początek wielkim cywilizacjom, aż do dziś. „Wielki Wybuch”, podczas którego powstał wszechświat, miał miejsce około 14 mld lat temu, co oznacza, że nastąpił około trzech umownych lat temu, czyli dwa umowne lata przed rozpoczęciem historii Ziemi. Jak wspominałem, najstarsze skamieniałości datuje się na 3,5 mld lat temu. W naszej skali moment powstania tych organizmów przypada na 28 marca. Ten mało zróżnicowany, jednokomórkowy świat wzbogacony został o organizmy tkankowe dopiero 5 listopada (ok. 750 mln lat temu). Później, jak się wydaje, losy świata organicznego potoczyły się bardzo szybko. Zdaniem wielu badaczy od kambru (ok. 540 mln lat temu), czyli 18 listopada, mamy do czynienia z prawdziwą eksplozją życia. Przyniosła ona w środkowym kambrze (w naszej skali 2 dni później) pojawienie się nie tylko znanych nam

Można by się raczej zastanawiać, czy z regresją ewolucyjną lub przynajmniej wyhamowaniem ewolucji nie mamy do czynienia w odniesieniu do człowieka. Dlaczego? Otóż na spowolnienie naszej ewolucji obecnie na pewno ma wpływ wysoko rozwinięta medycyna, pozwalająca przekazywać geny i utrzymywać przy życiu nawet najsłabsze osobniki. A wcześniej? Gatunek *Homo sapiens*, jak powszechnie uważa się, powstał około 200 tys. lat temu gdzieś w Afryce. 70 tys. lat temu wyruszył z Afryki i około 40 tys. lat temu dotarł do Europy. Przez cały ten czas podlegał intensywnym przemianom, ale od 40 tys. lat w genetycznej budowie naszego gatunku zaszły stosunkowo niewielkie zmiany, a od ostatnich kilkuset lat nasza różnorodność zaczęła zacierać się w błyskawicznym tempie za sprawą migracji ludzi i ujednolicania się naszej puli genowej. Wracamy więc do punktu wyjścia, kiedy pierwsi ludzie mieli bardzo zbliżone do siebie geny. Profesor Steve Jones z University College London, w wywiadzie dla tygodnika „Wprost” (fide Nieckuła 2009), uważa, że jeśli nic się nie zmieni, dołączymy do skamieniałości takich, jak latimeria, łodzik czy jeżowiec, wyglądających tak samo od milionów lat.

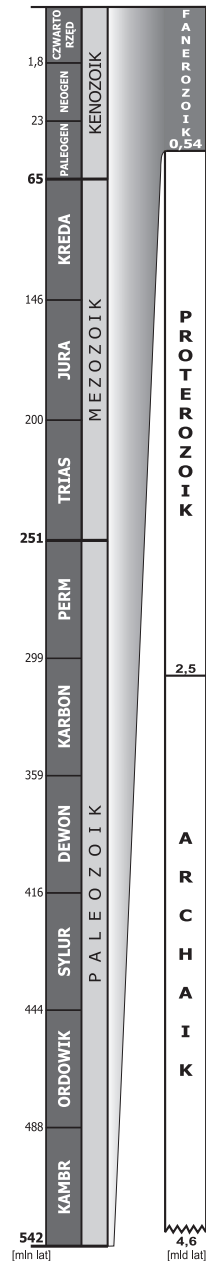
styczeń P W Ś C P S N 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	luty P W Ś C P S N 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28	marzec P W Ś C P S N 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31
kwiecień P W Ś C P S N 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30	maj P W Ś C P S N 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	czerwiec P W Ś C P S N 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30
lipiec P W Ś C P S N 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	sierpień P W Ś C P S N 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	wrzesień P W Ś C P S N 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30
październik P W Ś C P S N 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	listopad P W Ś C P S N 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30	grudzień P W Ś C P S N 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31

Ryc. 1. Historia Ziemi w skali jednego roku

ze współczesnego świata typów zwierząt, ale także tych, których plany budowy nie mają odpowiedników u obecnie żyjących organizmów. Dodam, że wystąpiły one wyłącznie na scenie kambru, co pozostaje nadal zagadką dla uczonych. Dalszym, chyba najbardziej spopularyzowanym, skutkiem tej eksplozji są dinozaury. Pojawiły się one w triasie (ok. 230 mln lat temu) i wymarły z końcem kredy (65 mln lat temu). Na naszym kalendarzu ich okres panowania (w rzeczywistości ok. 165 mln lat) zawiera się pomiędzy 13 a 26 grudnia. Wreszcie, swoistym punktem kulminacyjnym stało się „ukształtowanie” rodzaju *Homo*, znanego od 2 mln lat, co w przyjętym „terminarzu” przypadło kilkanaście minut po godzinie 20:00 ostatniego dnia roku. Natomiast nasz gatunek, *Homo sapiens*, przybył na świat zaledwie 23 min przed północą, w noc sylwestrową!

Geolodzy (i nie tylko) posługują się różnej rangi jednostkami czasowymi, którym stratygrafowie (naukowcy zajmujący się badaniem skał oraz ich występowaniem w przestrzeni i czasie) nadali nazwy własne i ujęli w tabelę stratygraficzną⁴ (ryc. 2). Do największych jednostek wyróżnionych przez stratygrafów należą eony, których w historii Ziemi mamy trzy. Najstarszy z nich to archaik, trwający od początku powstania Ziemi, czyli od około 4,6 mld lat temu do 2,5 mld lat temu. W zaproponowanej umownej skali czasu przypadłby on na okres od 1 stycznia do 14 czerwca. Na 2,5 mld lat wstecz datowany jest początek kolejnego eonu – proterozoicznego – kończącego się około 542 mln lat temu, tj. 18 listopada. Ostatni, zarazem najkrótszy, eon nazwany fanerozoikiem, rozpoczyna się z końcem eonu proterozoicznego i nadal trwa.

Nietrudno dokonać prostej kalkulacji, z której wynika, że łącznie eony archaiczny i proterozoiczny obejmują prawie 90% czasu geologicznego, liczonego od momentu powstania naszej planety. Niestety, ta bardzo odległa przeszłość geologiczna może być śledzona jedynie na około 20% powierzchni dzisiejszych lądów. Ponadto, większość tych najstarszych skał w trakcie kolejnych epok geologicznych uległa głębokim zmianom metamorficznym, które uniemożliwiają odtworzenie wczesnej historii Ziemi. Natomiast skamieniałości, dzięki którym możemy najlepiej poznać przeszłość geologiczną, występują w skałach archaiku sporadycznie. Ponadto należą one do mało zróżnicowanych organizmów mikroskopijnej wielkości, o zgeneralizowanych, przeważnie owalnych kształtach. Bardzo utrudnia to zdefiniowanie ich przyna-



Ryc. 2. Uproszczona tabela stratygraficzna z podziałem na eony oraz ery i okresy fanerozoiku

⁴ Zgodny z formalnymi wymogami, uniwersalny (międzynarodowy) schemat obrazujący przebieg historii Ziemi, dokonany na podstawie procesów geologicznych i ewolucji świata organicznego, odniesiony do różnej rangi jednostek czasowych; w kolejności od największej są to: eon, era, okres, epoka, wiek.

ležności systematycznej. Najlepiej rozpoznano eon fanerozoiczny. Wynika to przynajmniej z trzech faktów. Reprezentowany jest on przez najmłodsze skały, tworzące się w ciągu ostatnich około 500 mln lat. Skały tego wieku są powszechne na powierzchni Ziemi i zawierają dobrze zachowane skamieniałości, których różnicowane jakościowo nagromadzenia zawdzięczamy istotnej zdobyczy ewolucyjnej, mianowicie mineralnemu szkieletowi. Od najwcześniejszego okresu fanerozoiku (kambru) sprzyjał on osiąganiu przez organizmy dużych rozmiarów i większemu różnicowaniu ich form. Dzięki niemu fanerozoiczna fauna zyskała przewagę nad prekambryjską, której przedstawiciele mieli co najwyżej szkielet hydrauliczny⁵ lub pneumatyczny⁶.

Chociaż termin prekambr nie jest ujmowany w tabelach stratygraficznych, w związku z czym nie ma formalnego statusu, to powszechnie używa się go jednak do określenia czasu i skał istniejących przed kambrem. Obejmuje on więc pierwsze dwa największe eony – archaik i proterozoik. Jednak pomimo tak długiego czasu trwania pozostaje on dla nas okresem najbardziej tajemniczym. Głównie dlatego, że zachowało się niewiele jego pierwotnych skał zawierających jedynie mało różnicowane formy życia, z których bardziej zaawansowane ewolucyjnie, a więc takie, na podstawie których można konstruować modele paleośrodowisk, datować skały i dokonywać korelacji stratygraficznej, pojawiają się dopiero pod koniec tego okresu, tj. około 700 mln lat temu. Okres ten jest jednak dla nas bardzo interesujący, bowiem to właśnie w tym czasie rozwijały się prekambryjskie formy życia, w których uczeni upatrują źródeł bogactwa fanerozoicznego świata, włącznie z powstaniem człowieka. Wśród tych form istniała grupa organizmów nie do przecenienia z perspektywy ewolucji życia na naszym błękitnym globie. Miały one wszystkie podstawowe cechy wspólne dla całego, dziś obserwowanego świata. Choć należały one do prokariotów (z greck. *pros* – przed, *karyon* – jądro) – jednokomórkowych mikroorganizmów niezawierających jeszcze jądra komórkowego – w krótkim czasie posiadały zdolność wytwarzania tlenu. Ta właśnie cecha zadecydowała o gigantycznych zmianach nie tylko w świecie organicznym. Cała nasza planeta zaczęła stawać się wyjątkowa, jeśli nie we wszechświecie, to na pewno w Układzie Słonecznym. Produkowany przez te mikroorganizmy tlen nadał Ziemi, nie spotykaną w kosmosie, błękitną barwę. Sprawił też, że mogło rozwinąć się na niej bardziej zaawansowane życie, które osiągnęło tak skomplikowane

⁵ Sztywność i przestrzenny kształt struktur komórkowych (tkanek, organizmów) utrzymane są dzięki wewnętrznemu ciśnieniu płynów (turgor) na błony lub ściany komórkowe.

⁶ Jędrność komórek, tkanek czy organizmów zapewnia wewnętrzne ciśnienie gazów na błony lub ściany komórkowe.

formy, jak gatunek *Homo sapiens* – zdolny do myślenia abstrakcyjnego, a więc do klasyfikacji otaczających go zjawisk, ich opisu i refleksji, zwykle skutkującej pytaniami w stylu: A co było na początku?

Jeśli było „coś”, to w postaci, o której można mówić jedynie w kategorii mniej lub bardziej sugestywnej metafory, przynajmniej aż do momentu zwanego Wielkim Wybuchem (z ang. *Big-Bang*), po którym łatwiej już opisać sekwencję wydarzeń prowadzących do powstania życia.

Zgodnie z uznanym obecnie modelem kosmologicznym, którego podstawę stanowi ogólna teoria względności, rozmiary czasoprzestrzeni przed wybuchem uznaje się za nieskończenie małe, jej gęstość zaś za nieskończenie wielką. W takich warunkach wszystkie prawa nauki tracą ważność. Historia, którą możemy poznać, rozpoczęła się po upływie 10^{-43} sek.⁷ od Wielkiego Wybuchu. Po tym czasie wszechświat pozwala się już opisać za pomocą znanych nam praw fizyki. Z najnowszych pomiarów stałej Hubble’a wynika, że jego ekspansja, której obserwowanymi śladami jest przesunięcie widma gwiazd ku czerwieni, rozpoczęła się około 14 mld lat temu⁸. W miarę rozszerzania się kosmosu, jego temperatura malała o połowę na każdy dwukrotny wzrost jego promienia. Ponieważ jest ona miarą średniej energii lub prędkości cząstek, możemy stwierdzić, że postępujące ochłodzenie wywierało poważny wpływ na materię. Stygnący wszechświat zaczął więc powoli kondensować się. Dlatego dobrze udokumentowana jego historia rozpoczyna się dopiero w kilka minut po *Big-Bangu*⁹.

Gdy temperatura spadła do około 1000°C, powstały minerały zawierające: krzem, tlen, glin, wapń, żelazo, magnez, tytan. Dalsze ochłodzenie stworzyło warunki do zaistnienia minerałów zawierających związki węgla. Tak zawiązująca się materia podzieliła się na części, z których później powstały galaktyki. Dziś już wiemy, że rozmiary tych wydarzeń zmieniają nie tylko nasze pojmowanie czasu, ale także wielkości kosmosu. Galaktyka, w której miał się rozwinąć błękitny glob, jest tylko jedną z setek miliardów innych, każda z nich zaś zawiera setki miliardów gwiazd, które stanowią efekt dalszego podziału kosmicznego surowca. W tym przytłaczającym swymi rozmiarami sąsiedztwie nasza galaktyka przybrała formę spiralnego dysku o średnicy 100 tys. i grubości 2 tys. lat świetlnych (1 rok świetlny to ok. $9,5 \times 10^{12}$ km). Na jednym z ramion tej spirali, w pobliżu jej wewnętrznego brzegu, widnieje Słońce, którego rozmiary są przeciętne w porównaniu z innymi, o wiele większymi gwiazdami.

⁷ Okres od 10^{-43} do 10^{-36} według kosmologów zwany jest epoką kwantowej grawitacji; M. Rees, *Badając nasz i inne wszechświaty*, „Świat Nauki” 2003, nr 2.

⁸ *Mrok i energia*, tygodnik FORUM, <www.tygodnikforum.pl> [dostęp: 29.07.2008].

⁹ Trzy minuty po Wielkim Wybuchu rozpoczęła się synteza jąder atomowych; M. Rees, *Badając nasz i inne wszechświaty*, „Świat Nauki” 2003, nr 2.

Chcąc przybliżyć te wielkości, posłużę się zmniejszoną skalą metryczną. Przyjmijmy za jej podstawę średnicę Słońca zmniejszoną do 1 mm. Zmieniając proporcjonalnie wszystkie interesujące nas wartości, okaże się, że w tej skali średnica Ziemi wynosi 0,01 mm, iż Ziemia jest oddalona od Słońca o 10,7 cm, Merkury o 4,2 cm, a Pluton o 4,32 m. Droga Mleczna w tej skali osiągnie 688,500 km średnicy, a więc tyle, ile wynosi odległość z Ziemi do Księżyca.

Zgodnie z najczęściej przyjmowaną hipotezą, Ziemia, jako część Układu Słonecznego, powstała około 4,6 mld lat temu. Podobnie jak pozostałe jego ciała utworzyła się z wielkiej wirującej chmury gazu, pyłu i skał pochodzących z zewnętrznych fragmentów materii wyrzuconej w czasie wybuchu supernowej, jaką było wówczas Słońce. Oznacza to, że znaczna część materii obecnego Układu Słonecznego pochodzi właśnie od tej gwiazdy. Materia ta zawiera w swoim składzie 2% pierwiastków ciężkich. Pozwala to zaliczyć Słońce do gwiazd drugiej lub trzeciej generacji. Zatem około 5 mld lat wstecz Słońce po raz kolejny przeszło przez etap supernowej. Większość powstałego wówczas gazu została ponownie zużyta na budowę tej gwiazdy, a jej część uległa rozproszaniu. Pewna ilość ciężkich pierwiastków skupiła się, a następnie zastygła, tworząc planetozymale, czyli niewielkie stałe ciała kosmiczne. Wskutek działania grawitacji przyciągały się one wzajemnie i łączyły, dając zalążki planet okrążających Słońce. Materia wirująca z odpowiednią prędkością nie zapadała się ku własnemu centrum wskutek siły odśrodkowej. Niejednorodności powstające w takim dysku narastały i powiększały się. Różnice w prędkości obrotowej sprawiały, że zagęszczenia przyjmowały najpierw formę pierścieni, a później, pod wpływem grawitacji, postać planet i ich satelitów. Dochodziło wówczas do kolizji różnych obiektów kosmicznych, co z kolei prowadziło do powiększania ich masy. Ważną rolę odegrały gazy, które wyhamowywały ciała kosmiczne i umożliwiały ich zlepianie się. W ten sposób narodziły się protoplanety. Jedną z nich, oddaloną od Słońca o około 150 mln kilometrów, była właśnie Ziemia.

Planeta ta, we wczesnym archaiku, bardzo różniła się od tej, jaką znamy współcześnie, zwłaszcza jeśli weźmie się pod uwagę fakt, że przeżywała wówczas liczne katastrofy, jak chociażby częste bombardowanie przez planetoidy i materiał pozostały po uformowaniu się planet Układu Słonecznego. Uderzenia nowych planetozymali w istniejące już protoplanety, rozpad pierwiastków radioaktywnych oraz grawitacyjne kurczenie się kuli ziemskiej wyzwalały tak duże ilości energii, że rozgrzewały jej wnętrze i sprawiały, iż ówczesny glob był ciałem płynnym. W tym czasie cięższe substancje wchodzące w jego skład przemieszczały się do wnętrza, tworząc jądro. Gdy większość planetozymali została wchłonięta przez planety, a procesy

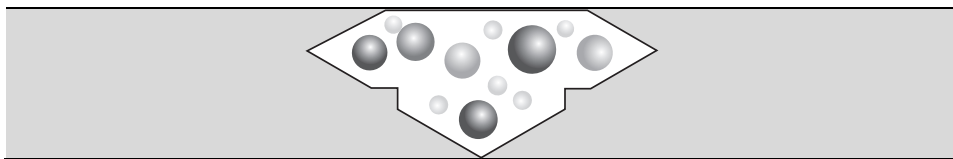
termojądrowe zmały, mogła powstać skorupa ziemska zbudowana z lżejszych pierwiastków.

Tak więc w chwili formowania się Ziemia zapewne była martwa i nieogócinna. Na jej powierzchni nie było jeszcze oceanów. Natomiast nieco ponad miliard lat później (ok. 3,5 mld lat temu) istniały już organizmy tak zróżnicowane, jak bakterie i sinice. Systemy żywe musiały zatem rozwinąć się w ciągu pierwszego miliarda lat istnienia naszej planety, a właściwie między 3,8 a 3,5 mld lat temu. Według naszego umownego kalendarza działo się to między 2 a 28 marca. Wcześniej, już jako uformowane ciało kosmiczne, Ziemię nękały różne wydarzenia termiczne. Od 4,1 do 3,8 mld lat wstecz (od połowy umownego lutego do początku marca) przeżyła ona okres wyjątkowo ciężkiego bombardowania asteroidami¹⁰. Uważa się, że energie wyzwolone w czasie tych zderzeń z młodą Ziemią były na tyle duże, że mogły przepalić jej zewnętrzne warstwy, skutecznie sterylizując ją ze wszystkich ewentualnych pierwotnych życia, które zdołałyby się na niej utworzyć. A tworzyć musiały się przynajmniej biomolekuły, bowiem nie sposób wyobrazić sobie nagłego pojawienia się organizmów 3,5 mld lat temu, bez wcześniejszych prób dochodzenia do ich powstania. Mało tego, prób takich musiało być wiele i to opartych na różnych substancjach wyjściowych. Niestety, zapewne nie dowiemy się, jak często owe próby mogły być podejmowane, ani co je inicjowało. Trudno bowiem liczyć w tej kwestii na informacje zawarte w skamieniałościach z tamtych czasów. Ich stan zachowania nie pozwala na ujawnienie danych budowy morfologicznej. Najstarsze znane „organizmy” miały kształty tak ujednolicone, że odróżnienie ich nawet od chemicznych związków organicznych często bywa niemożliwe. Ich szczątki z upływem miliardów lat mogły się zamienić w beładne nagromadzenia atomów. Warto jednak podkreślić, że niezależnie od tego, ile prób biogenezy pojawiało się we wczesnej historii Ziemi i co z nich pozostało, faktem jest, że udało się przetrwać organizmowi z polinukleotydowo-białkową strukturą, który w walce o byt wygrał wyścig z alternatywnymi formami.

Dziś większość badaczy zakłada, że substancje organiczne i powstałe z nich układy żywe mogły wytworzyć się w warunkach panujących na pierwotnej Ziemi. Niestety, mimo że uczeni zgadzają się w kwestii ogólnych zasad procesu biogenezy – do tego stopnia, iż wszystkie teorie opisujące powstanie życia niewiele różnią się od siebie – to jednocześnie przyznają, że wiele procesów i ewentualnych alternatywnych struktur trudno dziś sobie wyobrazić. Sprecyzowania wymaga też czas organizowania się materii or-

¹⁰ B.R. Roy, *Evidence for Ancient Bombardment of Earth*, <www.space.com> [dostęp: 25.06.2007].

ganicznej, co do którego opinie również są podzielone. Jednak zanim przejdę do charakterystyki wyjściowych warunków i odpowiem na pytanie, kiedy i w jaki sposób jedna z cząsteczek (lub inny fragment materii) przebywająca wewnątrz naładowanej energią chemiczną materii ziemskiej uzyskuje możliwość powielania samej siebie, powinniśmy zastanowić się nad samym ewenementem, jakim jest życie – nad tym, czym różni się układ żywy od otaczającego go nieożywionego świata.



CZYM JEST ŻYCIE?

Odpowiedzi na pytanie, czym jest życie i jak doszło do jego powstania oraz rozwoju, nie można łatwo ująć w ramy prostych definicji. Wydaje się, przynajmniej w świetle współczesnego stanu wiedzy, że te nurtujące nas zagadnienia wciąż będą podsycać naszą wyobraźnię, wskazując na granice naszych umiejętności konceptualizacji otaczającego nas świata. Pytanie zatem o istotę życia jest także problemem filozoficznym i religijnym. Powrócę jednak do nauk przyrodniczych: chemii, biologii i paleontologii. Chcąc przynajmniej częściowo zdefiniować fenomen życia, skieruję uwagę na współczesne gatunki roślin i zwierząt.

Powstały one w wyniku nieustannego, trwającego setki milionów lat ciągu przekształceń. Procesy życiowe natomiast stanowią efekt działania cząsteczek, które same nie są żywe. Tak więc organizm żywy to coś więcej niż suma składników go budujących. Ponadto, nie można wyjaśnić właściwości złożonego układu żywego, badając jego najprostsze elementy, czyli cząsteczki. Na poziomie molekularnym wszystkie procesy przebiegają wprawdzie zgodnie z prawami fizyki i chemii, ale na wyższym poziomie hierarchii biologicznej (komórka, organizm, populacja, gatunek) istnieją właściwości, których nie można przewidzieć na podstawie wiedzy o pojedynczych elementach składowych układu. Żywych organizmów nie da się więc zbadać metodami klasycznych nauk fizykochemicznych. Czy pomocną zatem może okazać się biologia? Odpowiedź i w tym przypadku nie wypada zadowalająco ze względu na narzędzia stosowane przez tę dyscyplinę do opisu świata organicznego. Wyróżnia się ona myśleniem populacyjnym i historycznym, uwzględniającym prawdopodobieństwo, losowość i emergencję¹¹.

¹¹ Słowo to (łac. *emerge* – wynurzam się) oznacza proces powstawania nowych jakości z oddziaływania na siebie prostych elementów lub pojedynczych obiektów, z badania których

Toteż z naszej wiedzy o ewolucji biologicznej wynika, że historia życia stanowi unikalny proces indywidualizowania się gatunków oraz ujawniania ekspresji ich genów. Biologia zajmuje się więc zbiorami pojedynczych i niepowtarzalnych osobników (populacji) oraz wydarzeniami jednostkowymi – takimi, które zdarzyły się tylko raz. Tym właśnie różni się od fizyki i innych nauk ścisłych, które najczęściej zajmują się procesami powtarzalnymi. Tam, gdzie jest powtarzalność, możliwe jest też ustalanie praw, według których procesy te muszą przebiegać, a zatem i możliwość przewidywania przyszłości. Potrafimy na przykład określić parametry lotu sztucznego satelity, zanim jeszcze zostanie wystrzelony z Ziemi, oraz jak zachowają się kule puszczane w ruch na pochyłych płaszczyznach. Natomiast wiedza o ewolucji ma charakter probabilistyczny. Pozwala na konstruowanie tylko możliwych scenariuszy wydarzeń przeszłych i przyszłych, co należy tu wyraźnie podkreślić. Oczywiście można też z chaosu zaszłych zdarzeń próbować odczytać ogólne prawidłowości i tendencje. Tak zwane prawa ewolucji, które próbowano nieraz formułować, były w najlepszym razie takimi właśnie „projektami”, a w najgorszym odzwierciedlały jedynie oczekiwania twórców hipotez niepoznawalnej do końca rzeczywistości, wciąż umykającej przed jednoznaczną diagnozą. Tak więc, mimo że jesteśmy już w stanie coraz dokładniej określić czas i miejsce „startu” znanego nam życia, niemożliwa do poznania wydaje się perspektywa jego przyszłości. Życie do niczego nie dąży – to nie sonda kosmiczna zmierzająca do określonego celu. Stawianie siebie – człowieka – na szczycie drabiny ewolucyjnej, którą przecież sami wymyśliliśmy, jest przejawem naszego antropocentryzmu wynikłego ze zdolności do abstrakcyjnego myślenia, co w gruncie rzeczy nie jest niczym złym¹². Przyjmując natomiast nieantropocentryczny punkt widzenia, można wyobrazić sobie inne, niepozbawione sensu scenariusze wydarzeń. Wystarczy przyjąć, że gdyby gady mezozoiczne u schyłku kredy nie ustąpiły pola ssakom, to dzisiaj w ogóle nie byłoby nam dane zastanawiać się nad istotą życia ani z punktu ideologicznego, ani naukowego... W ewolucji premiowana jest zawsze skuteczność, a nie postępowość. Ta ostatnia stworzyła wprawdzie elektrownie atomowe, ale nie uchroniła ich przed katastrofami i śmiercią reprezentantów ludzkiego świata. A skuteczność? Osiągać ją można w najrozmaitszy sposób, choćby na drodze zwielokrotnienia możliwości. A perspektywa możliwych różnorodności świata przekracza ramy wyobraźni.

nie sposób przewidzieć właściwości jednostek wyższego rzędu, np.: komórki, organizmu, stada czy ławicy.

¹² Ruchy New Age z negatywnego postrzegania antropocentryzmu wyprowadziły postulat, że natura jest ważniejsza niż człowiek.

Niezwykłe możliwości dla dalszej ewolucji otwarło powstanie samopowielających się, ewoluujących układów żywych, czerpiących informacje z zapisu genetycznego realizowanego przez dowolne ustawienie czterech elementów (zasad azotowych). Przyjmując za Arberem (1993, 2002), że w prostym genie występuje 1000 owych zasad azotowych, to liczba możliwych sekwencji takiego genu wynosi 4^{1000} , czyli 10^{602} . W trakcie ewolucji, przyjmując jedną zmianę zasady azotowej co minutę, od 3 mld lat „przetestowaniu” mogło ulec 10^{50} wariantów sekwencyjnych owego współczesnego genu. To znaczy, że 10^{552} sekwencji owego genu nie zostało jeszcze „wypróbowanych” w ewolucji. Liczba ta unaocznia niewyobrażalnie wielką przestrzeń ewolucyjną niezastosowanych jeszcze układów biologicznych. Wskazuje również na to, że przetestowanie olbrzymiej, ale jednak bardzo cząstkowej grupy sekwencji już doprowadziło do pojawienia się wysoko uorganizowanych form życia. Perspektywa dla życia niewątpliwie jest więc ogromna, choć nadal niewiele nam mówi o jego istocie. Na czym więc ona polega?

Znalezienie odpowiedzi na to pytanie wymaga najpierw określenia charakterystycznych właściwości stanu materii zwanego „życiem”. Zadanie nie jest łatwe, ponieważ, o czym wspomniałem nieco wcześniej, żadna z cząstek budujących żywy organizm sama żywa nie jest. Fakt ten daje podstawy do tworzenia nierzadko fantastycznych hipotez budowanych według innych zasad niż naukowe. Śledząc te definicje, łatwo można zauważyć, że to, co uznamy za żywe, zależy tylko od przyjętych przez nas kryteriów. Każda społeczność ma zawsze własny sposób oglądu świata. Współcześnie przywykliśmy do sięgania do wiedzy uczonych, by wyjaśnić jakieś zdarzenie. W ślad za naukowcami przyjmujemy też, że o świecie można mówić w sposób: potoczny, filozoficzny i religijny albo naukowy. Tak też mówi się o zagadce życia. Jednak perspektywy te, poza religijną, zawodzą w jej wyjaśnieniu. Naukowcy nie poddają się i wciąż kreują coraz to „doskonalsze” koncepcje dotyczące zagadki życia. Jednak każdy z tych pomysłów stanowi tylko model wydarzeń mający zarówno swoich zwolenników, jak i przeciwników.

Historia poglądów

Do 1978 r., czyli do odkrycia przez Iliję Prigoginę¹³ struktur dyssypatywnych (pobierając energię z otoczenia, rozpraszają ją, zwiększając równocześnie swój stan uporządkowania) życie sprawiało badaczom problem...

¹³ Znakomity fizyk, który za teorię struktur dyssypatywnych, w 1978 r. otrzymał Nagrodę Nobla w dziedzinie chemii.

samym faktem swojego istnienia. Wydawało się, że jest zjawiskiem przeczącym wszelkim prawom przyrody i wymyka się zasadom termodynamiki. Dziś już wiemy, że to właśnie termodynamika wymagała uzupełnień!

Organizmy żywe, zgodnie z tym, co odkryła fizyka, stanowią tylko jeden z przykładów układów dyssypatywnych. Złożoność molekularna oraz stan uporządkowania zdają się mieć zatem głębokie uzasadnienie w fizyce, a zwłaszcza w jej dziale zajmującym się energią i jej przemianami. Zgodnie z pierwszą zasadą termodynamiki organizmy pochłaniają energię ze swojego środowiska w formie użytecznej dla ich życia. Umożliwia im ona wykonanie pracy. Następnie zwracają do środowiska jej równoważną ilość, lecz w innej, mniej przydatnej dla nich formie. Na przykład w postaci ciepła, które ulegając w środowisku rozproszeniu, powoduje wzrost stopnia jego nieuporządkowania (entropii). Organizmy tym samym wytwarzają i utrzymują swój podstawowy stan uporządkowania (entalpie). Dzieje się to jednak kosztem środowiska, którego entropia w rezultacie ulega stopniowemu wzrostowi. Posługując się językiem termodynamiki, można określić, że żywe organizmy stanowią układy otwarte, ponieważ wymieniają ze środowiskiem zarówno energię, jak i materię z jednoczesnym przekształcaniem samych siebie i środowiska.

Zgoła odmiennie traktowano życie zanim nastąpiła rewolucja naukowa w XVII w. Jego powstanie wydawało się wówczas zupełnie proste do wytłumaczenia, a całość stanowiła pewnik światopoglądowy. Powszechnie przyjmowano, że to Bóg stworzył rodzaj ludzki i inne organizmy wyższe, owady zaś oraz „drobne żyjątka” prawdopodobnie powstały spontanicznie z mułu lub rozkładającej się materii organicznej. Ten ostatni pogląd wywodził się ze starożytności i należy go łączyć głównie z pracami naukowymi Arystotelesa. Filozof ten sądził, że nawet niektóre zwierzęta wyższe, na przykład żaby, mogą powstać samorodnie z mułu rzeczno¹⁴. Podobnie jak przyrodznawca Pliniusz uważał również, że wszystko na świecie składa się z materii i formy, którą u istot żywych jest entelechia – nadprzyrodzona siła formotwórcza nadająca martwej materii określony kształt żywych organizmów. Wiara w sprawczość tajemniczych sił była tak duża, że wprowadzenie naturalnego sposobu wyjaśnienia zjawisk rządzących światem nie mogło zyskać powszechnego przyzwolenia. Cały intelektualny dorobek, m.in.: Platona, Demokryta, Ksenofanesa, Epikura, w interpretacji fenomenu życia polegający głównie na eliminacji myślenia magicznego, pozostawał niedo-

¹⁴ W późniejszych przekazach można było nie tylko usłyszeć, ale i przeczytać o tym, jak z odpowiednich kombinacji kwiatów powstają pszczoły, a z oparów łaźni karaluchy; w XVII w. słynny był przepis brukselskiego lekarza, van Helmonta, na powstawanie myszy z ziaren pszenicy i starych szmat.

ceniony. Demokryt już w IV w. p.n.e. twierdził, że pierwsze żywe istoty powstały na skutek przypadkowego połączenia się atomów różnych ciał martwych. I cóż z tego? Taka myśl, choć wyprzedzała wprawdzie o tysiąclecia myślenie społeczne, to w gruncie rzeczy przez większość późniejszych wieków stanowiła zagrożenie dla raz ustalonego porządku i wobec tego nie mogła zostać przyjęta. Wyeliminowanie w znacznym stopniu wiary w moc sprawczą sił nadprzyrodzonych, tak obiecujące z punktu rozwoju nauki rozumianej według obecnych zasad, zostało w późniejszych stuleciach zapomniane. Stan przyrodoznawstwa w średniowieczu związany był z jego zdominowaniem przez doktryny religijne, nawiązujące do myśli chrześcijańskiej, w której, co warto tu także podkreślić, obecnie jest już miejsce na koncepcję ewolucji. Wtedy jednak, wykorzystując ówczesne interpretacje Pisma Świętego, poparte wybranymi przykładami z dzieł Arystotelesa, niewątpliwego autorytetu w tamtych czasach, w sposób dosłowny tłumaczono wszystkie zjawiska w przyrodzie jednorazowym boskim aktem sprawczym, sam ów akt pojmując również... dosłownie. Uważano, że świat jest niezmienny i istnieje od niedawna¹⁵. Światopogląd tego okresu przesiąknięty był także wiarą we wszelkiego rodzaju moce tajemne. Przekonanie o istnieniu „wszechobecnej siły życiowej” w pewnym sensie opóźniało przyjęcie innego punktu widzenia, reprezentowanego przez ludzi wyprzedzających swoją epokę, takich jak Leonardo da Vinci. Dopiero Kartezjusz, obwołany w XVII w. rzecznikiem rewolucji naukowej, skutecznie zwalczał idee przepełnione metafizyką i nadnaturalnymi bytami. Myśliciel ten zapoczątkował rozwój poglądu określanego jako mechanistyczny obraz świata¹⁶, również organicznego, z którego wyłączono jednak człowieka. Pod koniec wieku XVII ten prosty, dosłownie rozumiany obraz biblijnego aktu stworzenia zaczął tracić swoją oczywistość. Odkrycia naukowe osłabiły wiarygodność ówczesnego światopoglądu chrześcijańskiego, rozumianego nie jako zbawienie, ale jako wiara w niezmienność świata stworzonego przez Boga (kreacjonizm).

W połowie XVII w. Franciszek Redi, toskański lekarz, częściowo obalił również „prawdę” o samoródtwie. Wykonał wówczas pierwsze doświadczenia wykazujące, że białe robaki pojawiające się w mięsie nie powstają samorodnie, a są po prostu larwami much. Niemniej sugestywna i stanowiąca silny element światopoglądu w ówczesnej Europie „wiedza” o sile

¹⁵ Jeszcze w XIX w. uważano, że Ziemia powstała w południe 23 października 4004 r. p.n.e. Pogląd ten, opierając się na tekstach ze Starego Testamentu, na przełomie XVI i XVII w. wysunął arcybiskup James Ussher, prymas Irlandii. Ponieważ cieszył się on ogromnym autorytetem, jego „teoria” przetrwała ponad dwieście lat.

¹⁶ Mechanistyczny obraz świata ukształtował się w okresie nowożytnym i stanowił pewien etap w historii myśli. Szczególnie intensywnie rozwinął się po okresie rewolucji naukowej, splatając się z filozoficznymi, teologicznymi i naukowymi zagadnieniami tego okresu.

życiowej i wiara w tworzenie się istot żywych z materii nieorganicznej nie uchroniły Rediego od całkowitego wyzbycia się idei samoródtwa. Uczony ten dopuszczał między innymi możliwość samorodnego powstawania robaków jelitowych. Trudno się jednak dziwić tej postawie. Przecież współcześnie, kiedy nauka zajmuje bardzo istotne miejsce zarówno w systemie wartości, jak i działaniach ekonomicznych wielu społeczeństw, pogląd o samoródtwie nadal ma się dobrze i stanowi swoisty potoczny pewnik! Bo czyż nie zdarzyło się nam słyszeć, że nie utrzymując należytego porządku w domu, ryzykujemy, że „z brudu zalęgną się nam robaki”?

W wieku XVIII wstępnie zrozumiano wymiar geologicznej i astronomicznej skali czasu. Wtedy właśnie, gdy zaobserwowano różnice w biogeografii świata oraz wielką różnorodność fauny i flory w różnych jego częściach oraz zaczęto interpretować skamieniałości jako szczątki zwierząt i roślin z minionych epok, zrozumiano również, że organizmy żyjące na Ziemi nie pozostawały niezienne. Zaproponowano wiele nowych scenariuszy ich rozwoju, między innymi koncepcję wielokrotnych aktów stworzenia¹⁷. Choć propozycje te w szczegółach różniły się między sobą, wszystkie wciąż miały kreacjonistyczny charakter. Pierwszym uczonym, który podał w wątpliwość te poglądy, był Georges Buffon. Jego idee, propagowane w XVIII w., znalazły między innymi takich zwolenników, jak: Diderot, Blumenbach, Lamarck, pobudzając ich do spojrzenia na zjawisko życia w kategorii ewolucji.

Współczesny etap dyskusji nad zagadnieniem powstania życia zapoczątkowany został dopiero w połowie XIX w. przez dwa ważne wydarzenia naukowe. Pierwszym z nich stały się prace Ludwika Pasteura, w których uczony ostatecznie uznał za bezpodstawną koncepcję samoródtwa (abiogenezy) – spontanicznego powstawania organizmów żywych z materii nieożywionej. W 1865 r. przeprowadził on badania nad pebryną (choroba jedwabników), w wyniku których wykazał jej bakteryjną etiologię oraz opracował sposoby jej zapobiegania. Badając także charakter działania drożdży i innych drobnoustrojów w procesie fermentacji, podał sposoby zabezpieczania przed procesami rozkładu wywołanymi przez bakterie. Jego dokładne i przekonujące doświadczenia udowodniły, że nawet tak drobne organizmy, jak bakterie „rodzą się” z przypominających je rodziców. Prace Pasteura nie dały jednak odpowiedzi na pytanie, które same wywołały, mianowicie: Jak powstały pierwsze osobniki każdego gatunku?

Odpowiedź zasugerowało drugie wydarzenie – sformułowanie teorii doboru naturalnego, rozumianej jako zbiór niesprzyjających okoliczności wymuszający konkurencję organizmów, prowadzącą do adaptacji jednych

¹⁷ Georges Cuvier (1769–1832) między innymi dowiódł, ponad wszelką wątpliwość, że w przeszłości żyły gatunki, które już nie istnieją.

i eliminacji innych osobników. O możliwościach doboru decydują zarówno czynniki środowiskowe, jak i własności fenotypu – potencjalne możliwości organizmu pozwalające jemu na utrzymanie się w podlegających ciągłym zmianom warunkach środowiskowych. Zgodnie z koncepcją zaproponowaną przez Darwina i Wallace’a¹⁸ niektóre różnice między osobnikami w populacji są dziedziczne, a środowisko przyczynia się do doboru cech gwarantujących sobie swoistą nieśmiertelność. Ten proces, powtarzając się z pokolenia na pokolenie, może więc prowadzić do przekształceń prostych organizmów w bardziej złożone. Z teorii doboru naturalnego wynika, że wszystkie obecne formy żywe pochodzą od: bardzo odległego, prostego, wspólnego, pojedynczego przodka, który był zarazem pierwszym żywym organizmem na Ziemi. Określa się go dzisiaj „ostatnim wspólnym przodkiem życia” (z ang. LUCA: Last Universal Common Ancestor). Ostatnim, a nie pierwszym, gdyż jest najbliższym wspólnym przodkiem wszystkich współczesnych organizmów. Inni, odleglejsi protoplaści, jak wspominałem, musieli pojawić się wcześniej. Jednak przedstawiciele tych wczesnych form nie przetrwali do dziś. Może byli już nieobecni w czasie powstawania ostatniego wspólnego przodka, którego cechy, czyli ten sam zestaw aminokwasów i sposób zapisywania informacji genetycznej, mają wszystkie dziś żyjące organizmy żywe.

Podejście Darwina określa się jako selekcyonistyczne, a więc nieuznające bliżej niezdefiniowanej „siły życiowej” oraz nieokreślonych czynników takich, jak „energia” i „ruch”. Zaprzecza ono istnieniu zarówno witalistycznej (raczej metafizycznej niż naukowej), jak i fizykalistycznej (mechanistycznej) interpretacji pochodzenia organizmów, a w konsekwencji całej ówczesnej kosmicznej i boskiej teleologii. Darwinizm, tłumacząc mechanizm zmian ewolucyjnych doborem naturalnym będącym rezultatem walki o byt, stał się podstawą nowego paradygmatu wyjaśniającego życie.

Kiedy w 1800 r. Lamarck proponował pierwszą gradualistyczną teorię ewolucji, zakładającą stopniowe kumulowanie się w populacjach czy gatunkach drobnych zmian bez nieciągłości i skokowych wydarzeń, zyskała ona niewielu zwolenników. Nikt nie może natomiast zaprzeczyć, że opublikowanie przez Darwina w 1859 r. dzieła *O powstaniu gatunków*, a w kolejnych latach *O zmienności roślin i zwierząt* (1868), *O pochodzeniu człowieka i doborze naturalnym* (1871) spowodowało prawdziwą rewolucję naukową. W dziełach tych autor przedstawił wiele dowodów na to, że zwierzęta ewoluują w cza-

¹⁸ Choć dziś potocznie używamy terminów „teoria ewolucji” i „darwinizm” wymiennie, to warto przypomnieć, że w istocie Karol Darwin nie był jedynym odkrywcą ewolucji biologicznej. Na skutek zwlekania z opublikowaniem swej najbardziej doniosłej idei podzielił on honor tego odkrycia z innym brytyjskim naturalistą, młodszym od siebie o czternaście lat, Alfredem Russellem Wallace’em (1823–1913).

sie. Dziś, nie znajdując żadnych przekonujących dowodów świadczących przeciwko ewolucji, a jedynie potwierdzające jej słuszność, już prawie nikt nie wątpi w fakt jej istnienia. Większość badaczy uważa, że stanowi ona dobrze udokumentowany proces oraz że darwinowska koncepcja doboru naturalnego to podstawowy mechanizm odpowiedzialny za zmiany ewolucyjne. Pamiętać jednak musimy, że ewolucjonizm to nie jedyny pogląd, który odnosi się do powstania życia na Ziemi. Przeciwnym do niego jest kreacjonizm, często kojarzony, także przez badaczy prezentujących nauki społeczne, z postawą światopoglądową określaną jako fundamentalizm religijny. Sam termin fundamentalizm ma szerokie znaczenie. Według jednej z definicji dotyczy zjawisk o charakterze społecznym, wyznaniowym i politycznym, w centrum których dominuje powrót do religijnych pryncypiów jako wyraz negowania pluralizmu światopoglądowego współczesnych społeczeństw, modelu państwa obywatelskiego i liberalnego. Za początki fundamentalizmu należy uznać dyskusje na gruncie teologii w obrębie amerykańskiego protestantyzmu z XIX w. Powstał wówczas nurt teologiczny walczący z poglądami teologii liberalnej, która dopuszczała zastosowanie osiągnięć nauk humanistycznych w interpretacji tekstów biblijnych. Natomiast nowy nurt, konserwatywny, postulował brak zmian – według niego prawdy o powstaniu życia zawarte w Biblii są zrozumiałe wprost, a nowa nauka zagraża ich czystości. W oczywisty sposób owi fundamentaliści protestanccy domagali się też zakazu nauczania teorii Darwina w szkołach (Pace, Stefani 2002). Polacy mogli również śledzić dyskusję o celowości nauczania teorii Darwina w szkołach, co stało się za sprawą Romana i Macieja Giertychów. Ich poglądy wpisują się właśnie w rodzimą odmianę fundamentalizmu religijnego. Należy przy tym zaznaczyć, że szum medialny wokół wypowiedzi tych dwóch polityków nie przyczynił się do rzeczowego wyjaśnienia ani teorii Darwina, ani koncepcji kreacjonistycznej mającej i w naszym kraju swych zwolenników.

Również kładysty¹⁹ nie zgadzają się z akceptacją darwinizmu. Twierdzą oni, że ewolucja nie jest faktem udowodnionym do granic dokładności naukowej:

[...] wciąż nie mamy absolutnego dowodu dla teorii ewolucji, a to co mamy, to przeważnie pośrednie świadectwa przemawiające na rzecz tej teorii, która jeszcze nie posiada lepszej alternatywy.

¹⁹ Kladystyka, której twórcą był Willi Hennig (1950), nie jest teorią, lecz schematem klasyfikacji organizmów. Kładysty odrzucają dotychczasowy system klasyfikacyjny czerpiący z faktu istnienia podobieństw morfologicznych i proponują w zamian rzeczywiste pokrewieństwa między poszczególnymi gatunkami, opierając się na homologii cech.

Niemniej jednak nawet badacze, którzy deklarują swą przychylność dla teorii ewolucji, często tworzą jej mylne interpretacje. Ponadto, jej zasadnicze konsekwencje wzbudzają zażarte debaty w gronie samych ewolucjonistów. Być może tym tłumaczy się jej wyjątkowe oddziaływanie. Zarówno koncepcje bez wątpienia słuszne, jak i bezsprzecznie błędne są, w gruncie rzeczy, mało interesujące. Prawdziwie wielkie idee tak długo są żywe, jak długo prowokują nas do myślenia i dyskusji, a taką jest właśnie teoria ewolucji Darwina. Bo choć nie tłumaczy ona powstania samego życia z materii nieożywionej, to wyjaśnia pochodzenie jednych organizmów od drugih.

Wyjaśnienie powstania życia stanowiło dla Darwina wyzwanie i w pewnym sensie dylemat światopoglądowy. W dużej mierze uwidoczniają to jego stwierdzenia, z których wynika, że na ówczesną naukę wpływał cały kontekst kulturowy przejawiający się w ideologii, potrzebie odnoszenia wyjaśniania zjawisk świata przyrody do kategorii ostatecznych albo związanych z religią, albo z inną (naukową?) wersją światopoglądu. Znajduje to odbicie w tekstach Darwina. Z jednej strony, w ostatnim paragrafie swojego dzieła *O powstawaniu gatunków* umieścił on zdanie, że „Stwórca natchnął życiem kilka form lub jedną tylko” – reszty dokonała ewolucja. Z drugiej strony, w korespondencji prywatnej do przyjaciela Josepha Hookera, pochodzącej z 1871 r. (już po opublikowaniu *O powstaniu gatunków*), stwierdził:

Jeśli (Och!, jakie to duże Jeśli) jednak moglibyśmy sobie wyobrazić, że w jakimś ciepłym bajorku – zawierającym najrozmaitsze rodzaje soli amonowych i fosforanowych – poddanym działaniu światła, elektryczności, ciepła etc. powstanie na drodze chemicznej cząsteczki białka gotowej do kolejnych, jeszcze bardziej skomplikowanych przemian.

W tym ostatnim przypadku zasugerowano, że życie mogło być wynikiem przemian chemicznych, zwłaszcza że – jak dalej stwierdza:

Z tak prostego początku zdołał się rozwinąć i wciąż się jeszcze rozwija nieskończony szereg form najpiękniejszych i najbardziej godnych podziwu.

Niezależnie od tego, że widzimy tu odwołanie się i do Boga Stwórcy i do praw natury, które można wykazać na drodze eksperymentu, faktem pozostanie, że Darwin jako pierwszy zastanawiał się nad początkami życia, na gruncie nowoczesnej nauki nieodnoszącej się do czynników transcendentnych.

Przez znaczną część XX stulecia w badaniach nad powstaniem życia zmierzano do potwierdzenia prywatnej hipotezy Darwina, zgodnie z którą do powstania ostatniego wspólnego przodka (LUCA) mogło dojść bez nadnaturalnej interwencji, w wyniku spontanicznego oddziaływania stosunkowo prostych cząstek rozpuszczonych w jeziorach i oceanach prebiotycznego świata.

Współcześnie dość łatwo można wyjaśnić procesy życiowe na poziomie molekularnym za pomocą mechanizmów fizykochemicznych. Niestety, trudność sprawiają kolejne, coraz wyższe stopnie integracji w komórce, na których znaczenie tych mechanizmów maleje, jeśli nie znika zupełnie. Wyjątkowe właściwości żywych organizmów nie wynikają bowiem z ich składu, ale z ich organizacji, co odróżnia je od materii nieożywionej. Jak zauważył Smuts (1926): „całość jest czymś więcej niż sumą części”. To, co jest całością na jednym poziomie, staje się częścią na poziomie wyższym. Organizm żywy jest więc wysoce złożonym i uporządkowanym systemem o hierarchicznej organizacji, kierującym się własnymi prawami nieznanymi zastosowania w świecie nieożywionym. W złożonym systemie, na wyższych poziomach organizacji, pojawiają się nowe właściwości, których nie da się przewidzieć na podstawie wiedzy o elementach całości na niższym poziomie integracji.

Prowadzone obecnie liczne badania (patrz podrozdz. *Synteza cząsteczek budulcowych*) udowodniły, że tendencja do łączenia się prostszych elementów w bardziej złożone układy wpisuje się w konstrukcję naszego świata. To, co przed niewielu laty stanowiło sensację w paleontologii, dziś staje się powoli truizmem. Wielu ludzi żywi przekonanie, że nie istnieje już żadna przeszkoda, która uniemożliwiłaby wyjaśnienie zjawiska powstania życia z materii nieożywionej z fizykochemicznego punktu widzenia. Przyjmuje się, że w sprzyjających warunkach przełom w dziejach materii – powstanie układów żywych – mógł na Ziemi nastąpić samoistnie. W niniejszych rozważaniach nie będę zastanawiać się nad występowaniem źródeł życia gdzieś w kosmosie, z których materia organiczna „zaraziłaby” Ziemię. W ten sposób przecież niczego nie wyjaśnimy. Oddalimy jedynie problem poza granice naszej planety. Tymczasem niech wystarczy nam świadomość, że nasza planeta należąca do tego kosmosu jest dowodem na to, że życie w kosmosie wciąż się tworzy. Na dodatek Ziemia najprawdopodobniej nie stanowi w tym względzie wyjątku. Z dotychczasowych odkryć wynika wręcz, że układy słoneczne, podobne do naszego, mogą występować bardzo powszechnie, a w związku z tym także i planety podobne do naszej (Gaudi i in. 2008). Wydaje się więc, że również istnienie na nich ziemskiego odpowiednika życia jest całkiem możliwe. Do tej pory poznanych zostało 25 takich systemów, w których wokół jednej gwiazdy krąży kilka obiektów. Niemniej nie wszyscy uczeni zgadzają się, że znalezienie układu planetarnego podobnego do naszego musi gwarantować odkrycia znanego nam życia. W tej kwestii istotna jest definicja życia, którą posługuje się współczesna nauka. Aby przystać na fakt jego występowania poza Ziemią, należałoby przeformułować jego pojmowanie i tym samym nadać mu rangę uniwersalności kosmologicznej.

Definicje życia

Tymczasem próżno szukać satysfakcjonującej wszystkich definicji interesującego nas tu fenomenu, zwłaszcza że trudności nastrocza wypracowanie jasnej wykładni nawet jego ziemskiej wersji. Chociaż nie brakuje coraz to nowszych propozycji, to ich główną cechą jest wąskie rozumienie tej osobliwości, wynikające z rodzajów uprawianych przez autorów dyscyplin. Janu-ary Weiner w *Życiu i ewolucji biosfery* z 1999 r. napisał, że życie to endoenergetyczny proces fizykochemiczny, który polega na cyklicznym utlenianiu i redukowaniu związków węgla, realizowany przez powielające się organizmy. Proces ten, jak pisze dalej wspomniany autor, jest nieprzerwany, biosfera zaś pozostaje w stanie dalekim od równowagi termodynamicznej. Ponieważ replikacja makrocząsteczek odbywa się z błędami, skład reagujących cząsteczek ustawicznie zmienia się w sposób przypadkowy. Inną koncepcję życia przedstawił Steven M. Stanley w *Historii Ziemi* (2005). Stwierdził on, że istnieją dwie podstawowe cechy opisujące istotę żywą – zdolność do samoorganizacji i do autoreplikacji. Jednak, jak sam dalej przyznaje, zaproponowana definicja okazuje się nieściśła. Oznaczałaby ona na przykład, że wirusy, które charakteryzują się zdolnością replikacji, ale nie mają możliwości samoorganizacji, nie byłyby zaliczane do istot żywych. Z kolei rezygnując z pojęcia „samoorganizacji”, za żywe musielibyśmy uznać kryształ, które też potrafią się replikować. Kolejną definicję życia przedstawił William Schopf (2002) w *Kolebce życia*. Według tego autora „życie to przede wszystkim cztery pierwiastki: węgiel, wodór, tlen i azot – czasami w połączeniu z siarką i fosforem”. Natomiast Jerzy Dzik w *Dziejach życia na Ziemi* (1992) mówi o:

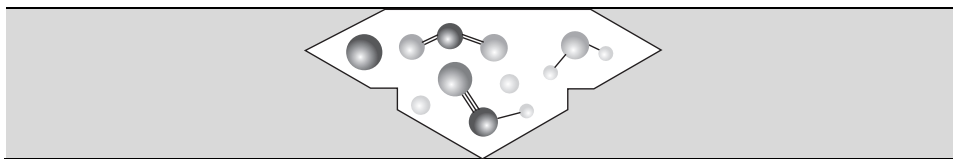
[...] samoreprodukujących się układach polinukleotydowych (lub polinukleotydowo-białkowych), na których losowo generowaną i inwariantnie (niejednoznacznie) dziedziczną zmienność właściwości w stosunku do środowiska działa dobór naturalny, czyli selekcja przez środowisko.

Różni autorzy próbują zdefiniować fenomen, jakim jest życie. Podchodzą zatem do zagadnienia bądź od strony funkcjonalnej, bądź strukturalnej. Pierwsze z tych ujęć dotyczy między innymi takich funkcji żywego organizmu, jak: zdobywanie materii i energii, metabolizm, rozwój, reprodukcja, przystosowanie do środowiska, a co za tym idzie – gwarantowany sukces w konkurencji prowadzącej do adaptacji. Drugie natomiast odwołuje się do cząsteczek budulcowych biorących udział w organizacji układów żywych, a więc do: kwasów nukleinowych, białek, wielocukrów czy lipidów.

Jak zapewne zdołaliśmy się przekonać, istota problemu tkwi w odpowiednim doborze kryteriów. Właściwe to te, które wyznaczyłyby linię de-

markacyjną między tym, co jest żywe a tym, co nie jest i nigdy nie było. Trudności z ujednoliceniem kryteriów nie wykluczają przyjęcia przynajmniej pięciu najistotniejszych cech żywej materii. Mowa tu o: (1) wysokim stopniu organizacji opartym głównie na czterech/sześciu (CHON/PS) pierwiastkach, (2) zdolności do pobierania i przekształcania energii pochodzącej z otaczającego środowiska oraz wykorzystywaniu jej do budowy i utrzymywania własnych skomplikowanych struktur, (3) zdolności do wykonywania pracy, (4) właściwości precyzyjnego samoodtwarzania się, (5) podleganiu ewolucji biologicznej będącej skutkiem działania doboru naturalnego na losowo powstającą i dziedziczną zmienność.

Życie, jakkolwiek by nie powstało i niezależnie od tego, jak je będziemy definiować, z całą pewnością „zrodziło się” w czasie bardzo odległym i w określonych warunkach. To konkretne środowisko, często, choć niesłusznie, określane jako nieprzyjazne, posłużyło życiu za kolebkę. Bez niego trudno w ogóle mówić o jego narodzinach. W kolejnym rozdziale przybliżę to środowisko na tyle, na ile pozwala na to współczesna nauka. Oczywiście stanie się również, dlaczego dzisiaj nie dochodzi do biogenezy i dlaczego w historii Ziemi, po powstaniu znanego nam życia, nigdy nie wytworzył się żaden alternatywny świat struktur żywych.



ZANIM „ŻYCIE” ZMIENIŁO ŚWIAT

Czerty żelaziste, najstarsze skały na Ziemi, występujące w formacji Isua Iron w zachodniej Grenlandii, datowane są na około 3,8 mld lat (w naszej skali to 2 marca). Są one o około 800 mln lat młodsze od ogólnie przyjętego wieku Ziemi, określonego między innymi na podstawie wieku meteorytów, planetoid i komet – resztek pierwotnej materii Układu Słonecznego wciąż krążącej w przestrzeni międzyplanetarnej. Co więcej, data powstania naszego globu (4,6 mld lat) okazuje się być zgodna z wiekiem części próbek przywiezionych z Księżyca przez misję Apollo. Jednym z kamieni (sic!) miłowych na drodze do poznania wieku Ziemi stał się meteoryt metaliczny Canyon Diablo, który spadł w USA, w stanie Arizona, około 50 tys. lat temu. W 1956 r. Patterson opublikował pracę, w której wykazał, że skład izotopowy ołowiu w tym meteorycie wskazuje na wspólne pochodzenie z ołowiem ziemskim. Ponadto, jego wiek wyliczony zmodyfikowaną metodą U-Pb, przy założeniu wspólnego pochodzenia obu próbek, dał wartość 4,567 mld lat. Jest to wynik, który później wielokrotnie potwierdzano danymi uzyskiwanymi z oznaczeń innych meteorytów. Jeśli więc słusznie przyjmujemy, że Ziemia formowała się z całym Układem Słonecznym, to spadające na jej powierzchnię „kosmiczne okruchy” stanowią niezwykle cenny materiał informacyjny. Jako niewielkie obiekty szybko ostygły, a ich zegary izotopowe, od momentu powstania w drodze kondensacji z mgławicy słonecznej, nigdy nie zostały wyzerowane przez podgrzanie czy działanie czynników chemicznych. Pozostając przez miliardy lat w temperaturze zera absolutnego, zachowały obraz tego, co było na początku. Izotopowe metody badania wieku skał polegają na określaniu w danej skale zawartości niestabilnego izotopu pierwiastka radioaktywnego i produktu jego rozpadu. Każdy niestabilny izotop po pewnym czasie ulega rozpadowi. Okres, jaki mija do momentu,

kiedy ze 100% izotopu zostanie 50%, nazywamy czasem połowicznego rozpadu. Porównując ilość izotopu i produktu jego rozpadu oraz znając czas połowicznego rozpadu izotopu, możemy określić wiek skały. Niestety, określił on czas, jaki upłynął od ostatniego podgrzania skały, ponieważ w bardzo wysokich temperaturach izotopy i produkty ich rozpadu są z niej uwalniane (jest to zatem zerowanie zegara izotopowego). Ponowny rozpad izotopu rozpocznie się dopiero po wykryształowaniu nowej skały. Takie ustalenia prowokują do postawienia ważnego pytania, czy wiek najstarszych skał, budujących skorupę ziemską, wyznacza koniec epoki intensywnego bombardowania Ziemi planetozymalami, tj. różnej wielkości (od kilku mm do kilkuset km) bryłami skalnymi będącymi resztkami materii pozostałej po formowaniu się planet.

Nie jest to wykluczone, chociaż zagorzali sceptycy, przywiązani do starych pomysłów nawiązujących do wolno stygnącej Ziemi, twierdzą, że takiego właśnie czasu (800 mln lat; od 4,6 do 3,8 mld lat temu) wymagało utworzenie się pierwotnej skorupy ziemskiej. Natomiast według nowszych poglądów (Wilde i in. 2001) powierzchnia Ziemi schładzała się względnie szybko, tworząc skorupę na przestrzeni 150 mln lat (odwołując się do naszego kalendarza trwałoby to od 1 do 12 stycznia). Jedne z ostatnich badań²⁰, prowadzone w zachodnioaustralijskich wzgórzach Jack Hills, wykorzystują wyniki pomiarów poziomu hafnu, pierwiastka występującego w przyrodzie zawsze wspólnie z cyrkonem. Wiek najstarszego kryształu cyrkonu znalezionego w tych górach oszacowano na 4,4 mld lat²¹. Natomiast z analizy tych kryształów wynika, że skorupa ziemska istniała już 4,5 mld lat temu (czyli od rana 6 stycznia wg naszego kalendarza). Jednakże do obecnych czasów (poza niewielkimi kryształkami) nic prawie z niej nie pozostało. Z upływem czasu skały starsze od 3,8 mld lat bądź zostały usunięte przez erozję, bądź przykryte młodszymi skałami osadowymi, względnie zostały wchłonięte w strefach subdukcji. Nie wróży to więc szybkiego, o ile w ogóle, poznania najstarszej historii naszej planety, bowiem w każdym z tych przypadków skały stają się dla nas nieosiągalne.

Nie brakuje też poglądów zakładających, że skały na powierzchni Ziemi jeszcze przynajmniej kilka razy podlegały intensywnym, metamorficznym zdarzeniom termicznym. O jednym z nich, które miało miejsce około 4,1–4,0 mld lat temu, już wspominałem. Wtedy to na Ziemię spadł „deszcz meteoroidów” – ostatnie duże, grawitacyjne ściągnięcie resztek po epoce formowania się planet w procesie akrecji. Księżyc, który nie ma atmosfery, pozbawiony pro-

²⁰ *Early Earth likely had continents and was habitable*. "Science Daily" <<http://www.colorado.edu/news/releases/2005/438.html>> [dostęp: 18.11.2005].

²¹ <<http://archiwum.wiz.pl/2001/01041700.asp>>.

cesów górotwórczych, na którym nigdy nie padał deszcz, a skały nie ulegały wietrzeniu, jest doskonałym świadkiem tego zdarzenia. Pokryty setkami kraterów wyraźnie świadczy o katastroficznej przeszłości obu ciał. Ziemia, jako większy obiekt, z pewnością była nawet częściej doświadczana kolizjami z mniejszymi i większymi obiektami kosmicznymi. Z datowań skał z kraterów Księżyca wynika, że wielkie bombardowanie zakończyło się około 4,0 mld lat temu. Przypuszcza się, że tego rodzaju zderzenia miałyby istotny wpływ na geologię Ziemi, gdyż zaburzałyby ruchy konwekcyjne²² w płaszczu, odpowiedzialne za wczesną tektonikę płyt. Uwalniałyby także gwałtownie gorącą materię z płaszczu. Energia wyzwolona w momencie zderzenia tych ciał z Ziemią mogła doprowadzić do przetopienia nawet całej, wówczas cienkiej (średnio ok. 20 km grubości, obecnie 38 km) skorupy, prowadząc do zresetowania zegarów radiometrycznych. Innym, ale podobnym w skutkach zdarzeniem, które prawdopodobnie zaszło między 4,6 a 4,0 mld lat temu, było formowanie się jądra naszego globu. Zgodnie z powszechnie przyjętym poglądem o „płynnej historii” wczesnej Ziemi, musiało dojść do zróżnicowania chemizmu magmy pod wpływem czynników fizykochemicznych (dyferencjacja). Różniące się masą składniki magmy uległy separacji podczas opadania w zbiorniku magmowym. Cięższe, jak żelazo i nikiel, zgromadziły się w środku, a lżejsze, jak sód, potas czy tlenek krzemu, w warstwach przypowierzchniowych. Oblicza się, że wyzwolona wówczas energia grawitacyjna była w stanie doprowadzić do przetopienia zewnętrznych warstw skorupy.

Jeszcze inne z możliwych wyjaśnień tłumaczących nieobecności na naszej planecie skał tak starych, jak szacowany jej wiek, głosi, że w czasie około 4,4 mld lat temu nastąpiło zderzenie młodej Ziemi z obiektem wielkością dorównującym Marsowi, który stał się głównym źródłem materii dla przyszłego Księżyca²³. Mała prędkość (7–10 km/s) i mały kąt, przy jakich przebiegać mogła owa kolizja, nie były wystarczające do zniszczenia (rozerwania i „rozsypania się”) Ziemi, lecz okazały się na tyle istotne, by wybić pewną część jej skorupy daleko za atmosferę. Ta klasyczna już dzisiaj hipoteza „wielkiego zderzenia” tłumaczy tak wiele faktów, że od chwili jej ogłoszenia utrzymuje pozycję koncepcji wiodącej. Zdaniem jej zwolenników wyjaśnia ona brak w Księżycu metalicznego jądra, które w chwili zderzenia obu ciał przebiło się przez ten obiekt, wbijając się w Ziemię. Dzięki temu Ziemia zyskała zdecydowanie największe, w porównaniu z pozostałymi planetami

²² Pionowe przenoszenie energii cieplnej z przemieszczającą się materią.

²³ Pewne dowody na istnienie ziemskiego satelity mamy od 3,0 mld lat; stromatolity (patrz podrozdz. *Bakterie i sinice*) z tego okresu wykazują warstewkowanie pływowe, a miliard lat temu wysokość pływów nie była większa niż obecnie (Schopf 1987). Przy założeniu powolnego oddalania się Księżyca od Ziemi, możemy sądzić, że powstał znacznie przed 3,0 mld lat temu.

naszego układu, metaliczne centrum. W świetle tej koncepcji jest oczywisty także fakt mniejszego udziału lotnej materii i braku na Księżycu takich pierwiastków lotnych, jak: potas, sód, bizmut, tal. Wyparowały one w wyniku wyzwolenia dużych ilości ciepła powstałego w efekcie zderzenia. Energia tego zderzenia sprawiła, że lokalnie stopiły się skały na powierzchni naszej planety, a przechwycona przez Księżyc materia pozbawiona była wody²⁴. Obecnie skały na Księżycu są „suche”, nie ma w nich nawet wody związanej chemicznie ani połączeń zawierających grupy wodorotlenowe OH. Hipoteza ta wyjaśnia również przechylenie osi obrotu Ziemi względem jej płaszczyzny wędrówki wokół Słońca.

Nasz glob, bardzo gorący na wczesnych etapach ewolucji, długo utrzymywał wyższy od obecnego gradient termiczny. Cienką, pierwotną skorupę ziemską tworzyły skały zasadowe i ultrazasadowe. Stanowiły one strukturę niestabilną. Prądy konwekcyjne wciągały jej fragmenty do górnego płaszcza, gdzie ulegały one przetapianiu, a na spękaną powierzchnię szeroko wylewały się lawy. Wyniki badań stosunków fazowych perydotytów²⁵ z paleoarchaiku, to jest z drugiej po eoarchaicznej erze prekambriu (ok. 3,6–3,2 mld lat temu), wskazują na temperaturę magmy 1650°C, czyli o około 400°C wyższą niż dla porównywalnych typów skał tworzących się obecnie (Green i in. 1975). Przy tak wysokich temperaturach panujących na niewielkiej głębokości granit nie mógł całkowicie wyodrębnić się z pierwotnych skał praskorupy o składzie bazaltowym. Dopiero przy grubości litosfery równej 25 km jej przetapianie uwolniło magmy granitowe, zapoczątkowując proces dyferencjacji magmy – wyodrębniania się różnej gęstości składników przyszłych skał. Z czasem, w wyniku tego procesu, zaczęły powstawać pierwsze skały obojętne, a później skały magmowe kwaśne. W ten sposób tworzyły się zaczątki kontynentów zwane mikrokontynentami. W wyniku niszczenia skał pierwotnej skorupy te protokontynenty w strefach subdukcji trafiały do ponownego obiegu, zakwaszając istniejące już magmy. W archaiku, w miarę obniżania się gradientu termicznego, różnica gęstości między skałami bazaltowymi (zasadowymi) i granitowymi (kwaśnymi) nabierała większego znaczenia, prowadząc do powiększania się kontynentów oraz podziału litosfery na kry oceaniczne i kontynentalne. Powiększanie się obszarów kontynentalnych miało charakter akrecyjny i wiązało się z procesami zachodzącymi w strefach subdukcji znajdujących się na skraju płyt²⁶. Następowало ono

²⁴ Wykryte jedynie niewielkie ilości wody w nieoświetlonych partiach Księżyca uważa się po części za pozostałości grawitacyjnie zatrzymanej pary wodnej pochodzącej z odgazowania skał, po części zaś pochodzącej z lodowych komet.

²⁵ Ultrazasadowa skała głębinowa zawiera mniej niż 45% krzemionki.

²⁶ Subdukcja to proces polegający na grawitacyjno-konwekcyjnym wciąganiu skorupy oceanicznej pod kontynentalną; obszar, na którym zachodzi – od rowu oceanicznego do gór-

w wyniku przyrastania do jąder mikrokontynentów, nowych, młodszych fragmentów (masywów) składających się z gnejsów, granitoidów i pasm zieleńcowych.

W nie do końca ustalonym okresie historii naszego globu erozja – proces unikalny w Układzie Słonecznym – towarzysząca niemal od początku istnienia Ziemi sprawiła, że strome brzegi pierwszych kontynentów zmieniły się w łagodnie nachylone szelfy. Skutkiem tego pierwotnie wyłącznie głębokomorskie baseny sedymentacyjne zyskały nowe środowiska. W proterozoiku obok skał krystalicznych znaczny udział w budowie skorupy zyskały również płytkowodne skały osadowe²⁷ – szczególnie istotne, gdyż niosące znacznie bogatszy zapis informacji o dawnych środowiskach sedymentacyjnych. Przede wszystkim zawierają one skamieniałości – niepodważalne dowody istnienia życia na Ziemi. Z ich analizy możemy dowiedzieć się na przykład o ówczynie panującym klimacie. I tak, skały pochodzenia chemicznego oraz czerwono zabarwione piaskowce, mułowce i łupki, dość powszechnie występujące w proterozoiku, świadczą o występowaniu w pewnych okresach tego eonu klimatu suchego i gorącego. Natomiast obecność tillitów, skał powstałych w wyniku działalności lądolodów, na przykład kopalne gliny zwałowe, dowodzi również okresów zlodowaceń. Obecnie znanych jest ponad 300 miejsc występowania prekambryjskich tillitów położonych na różnych szerokościach geograficznych. Główne ich kompleksy stwierdzono w starszym proterozoiku (2,3–2,2 mld lat temu – epoka huronńska) oraz w młodszym proterozoiku (0,77–0,60 mld lat temu – np. zlodowacenia Varanger i Laplandzkie). Znane są też skały osadowe powstałe w rezultacie topnienia gór lodowych w oceanie, a także osady fluwioglacjalne związane z odpływem wód roztopowych od lodowca.

Dzieje wody na Ziemi

Potoczne przypuszczenie, że woda była prapoczątkiem wszystkiego, znalazło swe odbicie w legendach i mitach wielu narodów. Nauka nie tylko zdaje się potwierdzać to założenie, ale też stawia istotne pytanie: Jak dawno doszło do zróżnicowania na lądy i baseny oceaniczne? Skoro dziś już prawie nikt nie wątpi, że życie zrodziło się w oceanach, to znając przybliżony czas

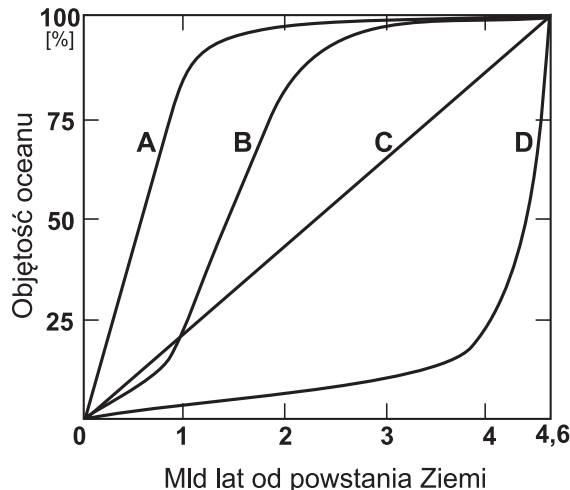
nego płaszczu – nazywa się strefą subdukcji. Ulegająca subdukcji kora oceaniczna w początkowej fazie często traci pokrywę osadową, która zdzierana w postaci pryzm akrecyjnych odkładana jest na krawędzi kontynentu. W przypadku gdy z krą oceaniczną wędruje wyspa, również może zostać dobudowana do istniejącego lądu, powiększając jego powierzchnię.

²⁷ Najstarszym znanym osadem są liczące 3,8 mld lat czerty żelaziste i węglany formacji Isua Iron – skały morskiego pochodzenia.

i tempo procesów prowadzących do powstawania wolnej wody, można by określić początkowy czas rozpoczęcia się reakcji chemicznych prowadzących do wczesnego etapu biogenezy. Co więcej, wiedząc, że skład chemiczny płynów fizjologicznych u współczesnych gatunków morskich i lądowych jest zbliżony do wody morskiej, możemy powiedzieć, że procesy fizjologiczne też najpierw rozwinęły się w środowisku morskim.

W kwestii tempa akumulacji wody na ogół istnieją cztery propozycje interpretacji (ryc. 3): raptowne i bardzo wczesne, około 4,4 mld lat temu (ryc. 3, krzywa A), raptowne, ale dopiero około 3,8 mld lat temu (ryc. 3, krzywa B), w stałym tempie (ryc. 3, prosta C) oraz raptownie i późno w historii geologicznej, gdzieś na przelomie jury i kredy (ryc. 3, krzywa D). Wszystkie te schematy natomiast zgodnie wynikają z twierdzenia, że ocean wywodzi się z wnętrza Ziemi, z odgazowania bazaltów lądowych i oceanicznych. Najmniej popularny jest ostatni pogląd, choć i w stosunku do trzech pierwszych wciąż brakuje uczonym pewności, w jaki sposób przebiegał proces uwalniania się pary wodnej: stopniowo od archaiku do dzisiaj czy gwałtownie w archaiku?

Do niedawna przyjmowano, że para wodna wydobywała się sukcesywnie z gazami wulkanicznymi ze skał wnętrza ukształtowanej już Ziemi. Z ogłoszeniem teorii Wegenera (1929), mówiącej o niestałości lądów i oceanów, a później teorii tektoniki kier litosfery (Isaacs i in. 1968) oczywiste stało się, że oceany z ich bazaltowym podłożem są w ciągłym ruchu. Kiedy okazało się, że dynamika skorupy oceanicznej polega na ciągłym odmładzaniu



Ryc. 3. Hipotetyczne tempo przyrostu wody w oceanach (Schopf 1987)

100% – obecna zawartość wody w oceanach

jej w strefach ryftów i „konsumowaniu” w strefach subdukcji, za oczywiste przyjęto, że dna oceaniczne zachowują się jak pas transmisyjny przesuwający się od ryftu do strefy subdukcji. Oznacza to, że para wodna stopniowo wydostając się, głównie ze skał przyrastających w strefach ryftowych, nieustannie wzbogaca Ziemię w tak zwane wody juvenilne (ryc. 3, prosta C). Główną oznaką tego wciąż zachodzącego procesu odgazowania płaszczu jest izotopowy skład gazów (w tym szlachetnych), związanych z erupcjami w oceanach, odmienny od składu dzisiejszych oceanów i atmosfery, a zbliżony do zawartości tych izotopów na Słońcu czy w meteorytach. Najważniejszą, jak dotąd, poszlakę stanowi proporcja $^3\text{He}/^4\text{He}$. W niewielkich ilościach występujący dziś na powierzchni Ziemi ^3He w znacznym nadmiarze występuje zarówno w głębokich wodach oceanicznych, jak i w lawach poduszkowych podmorskich bazaltów. Clarke, Beg i Craig (1969; patrz Schopf 1987) uważają, że ten nadmiar ^3He spowodowany został uchodzeniem pozostałości pierwotnego ziemskiego ^3He do wody oceanicznej. Mamy zatem dowód, że proces odgazowania ciągle zachodzi. Czy jest on w stanie zapewnić $1,37 \times 10^9 \text{ km}^3$ szacowanej objętości wody występującej obecnie na Ziemi? Z najnowszych obliczeń wynika, że nie. Zachodzące do dziś, głównie w dnach oceanów, ciągle wydobywanie się wód juvenilnych z wnętrza planety na jej powierzchnię odbywa się zbyt wolno i w niewystarczającej objętości.

W bazaltach pochodzących z płaszczu woda stanowi 0,5% ich objętości. Oznacza to uwolnienie w ciągu ostatnich 3,5 mld lat: $0,25 \times 10^9 \text{ km}^3$ wody z bazaltów oceanicznych przy założeniu, że grubość skorupy oceanicznej wynosi 10 km i odnawia się co 200 mln lat²⁸, oraz $0,0175 \times 10^9 \text{ km}^3$ wody z bazaltów lądowych, przyjmując, że rocznie na lądach tworzy się 1 km³ bazaltów²⁹. Obecna ilość wody w oceanach nie może być zatem wytłumaczona stopniowym oddawaniem wody przez bazalty podczas ostatnich 3,5 mld lat. W istocie, aby osiągnąć taką objętość, nie wystarczyłoby na to nawet tak długi czas, jak 4,6 mld lat istnienia Ziemi.

Znacznie więcej uwagi uczeni poświęcają hipotezie, według której niemal cała woda pojawiła się dość wcześnie, podczas ostatnich etapów formowania się naszej planety. Choć obecnie może zachodzić niewielkie odgazowanie, to większość wody do światowego oceanu dostarczyło wczesne, katastroficzne odgazowanie. Potencjalnymi sprawcami takiego przebiegu zdarzeń mogły być wspomniane czynniki termiczne: „deszcz meteory-

²⁸ Na tyle obecnie datowane są najstarsze skały den oceanicznych.

²⁹ Szacunkowe wyniki wg Sappera z 1927 r., patrz Schopf 1987. Choć w archaiku wulkanizm lądowy mógł być intensywniejszy, to z uwagi na mniejszą powierzchnię ówczesnych lądów łączna objętość skał wulkanicznych nie musiała być większa od współczesnej.

tów”; powstanie jądra ziemskiego i uwolnienie energii grawitacyjnej; pojawienie się naszego satelity, poprzedzone kolizją z Ziemią – ogół tych zdarzeń przy okazji mógł w całości „wyzerować” ziemskie systemy izotopowe, zacierając tym samym ślady wcześniejszej przeszłości. We wszystkich tych przypadkach uwolniona energia mogła być na tyle duża, że bardzo prawdopodobne jest upłynnienie górnych warstw skorupy ziemskiej, a więc i odgazowanie płynnych skał.

Z bezpośrednich dowodów na istnienie wczesnego odgazowania skał bazaltowych na uwagę zasługuje beryl, a dokładnie inkluzje zawierające rzadkie gazy (tj. takie, których udział w obecnej ziemskiej atmosferze jest bardzo niski). W trakcie krystalizacji tego minerału zostały one zamknięte w jego wnętrzu. I tak, zawartości ^{40}Ar i ^4He w berylach młodszych od 1,0 mld lat są o rząd wielkości niższe niż w datowanych na ponad 2,5 mld lat, co wskazuje na znaczny stopień odgazowania w archaiku (Fanale 1971; patrz Schopf 1987). Podobnie wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ w skałach osadowych wieku 3,8–2,5 mld lat są zbliżone do tych w płaszczu Ziemi. Proporcje izotopów strontu w młodszych skałach są mniejsze. Według interpretacji Veizera (1976), wyższe wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ odpowiadają wietrzeniu ówczesnych kontynentów zbudowanych głównie ze skał zasadowych, natomiast proporcje w skałach młodszych stanowią rezultat wymieszania bazaltowych i granitowych izotopów strontu. Dalszym dowodem na gwałtowne odgazowanie jest anormalnie niska zawartość deuteru w skałach starszych od 2,5 mld lat. Zdaniem Taylora (1977), dawne magmy granitowe tworzyły się z górnego płaszcza, niezanieczyszczonego jeszcze minerałami wodorotlenowymi.

W konsekwencji schładzania się Ziemi para wodna z płaszcza ulegała kondensacji i opadała na jej powierzchnię w postaci deszczu. Proces ten w ciągu około 750 mln lat doprowadził do utworzenia się oceanów około 3,8 mld lat temu lub nieco wcześniej. Niedawno opublikowane wyniki badań (Cavosie i in. 2005) sugerują nawet, że oceany mogły powstać już 4,2 mld lat temu (29 stycznia wg naszego modelu historii Ziemi), gdyż z tego okresu pochodzą najstarsze cyrkony, znajdowane w skałach okruchowych.

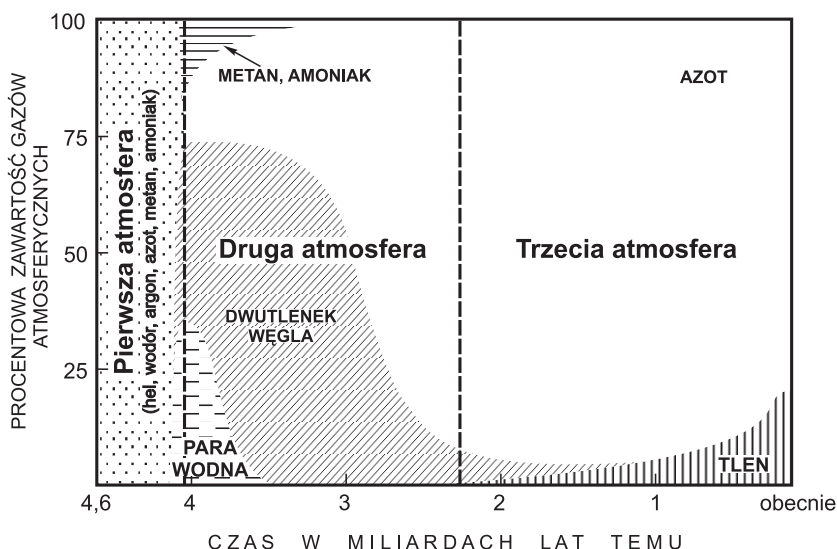
Zdaniem Schopfa (1987), przyjmując pogląd o wczesnym, niemal całkowitym odgazowaniu wnętrza Ziemi, możliwe stało się osiągnięcie stosunkowo szybkiego stanu równowagi chemicznej oceanów na poziomie obserwowanym obecnie. Jedynie ich pH nie tylko znacznie odbiegało od współczesnego, ale i o wiele dłużej było obniżone. Warunkowały je bowiem lotne substancje kwaśne: CO, CO₂, fazy siarczkowe i halogenki, które dopiero pod koniec prekambriu zmniejszyły swój udział w atmosferze. W tym czasie powierzchnia skorupy kontynentalnej powiększyła się ponad dwukrotnie i w kambrze osiągnęła obecne rozmiary, a baseny oceaniczne uzyskały swoją aktualną średnią głębokość, ponieważ skorupa kontynentalna i oceaniczna

są we wzajemnej równowadze izostatycznej. Czy po powstaniu oceanów życie mogło zadomowić się na Ziemi już na stałe? Odpowiedź na to pytanie wymusza poruszenie kolejnego istotnego przejawu ewolucji Ziemi, mianowicie powstania atmosfery.

Rodowód ziemskiej atmosfery

Historia atmosfery ziemskiej jest równie ważna jak opisana geneza wody. Poznanie pełnego składu wczesnej atmosfery ziemskiej rozwiąże istotne dla biogenezy zagadnienie gazów rozpuszczanych w wodzie.

Bardzo wiele faktów wskazuje na to, że od 4,6 mld lat wstecz do dziś atmosfera ziemska przeszła długi proces przeobrażeń, a jej skład chemiczny uległ wielu zmianom. Bez wątpienia można wyróżnić trzy główne etapy tego procesu. Pierwszy z nich charakteryzował się silnie redukcyjną atmosferą, zbudowaną głównie z wodoru i helu. Etap ten trwał od 4,6 do około 4,3 mld lat temu. W drugim stadium atmosfera wyróżniała się obojętną naturą, z dominującą rolą: dwutlenku i tlenku węgla, azotu oraz pary wodnej. Sytuacja taka najprawdopodobniej miała miejsce od 4,3 do 2,2 mld lat temu. Na trzecim etapie, trwającym do dziś, atmosfera wyraźnie zmieniła swój charakter na utleniający, ponieważ tlen stał się drugim po azocie jej pierwiastkiem składowym (ryc. 4).



Ryc. 4. Ewolucja ziemskiej atmosfery <<http://ircamera.as.arizona.edu/NatSci102/NatSci102/lectures/earth.htm>> [uzupełnione]

Wielce prawdopodobne wydaje się, że pierwsza atmosfera formującej się Ziemi powstała z materii mgławicy słonecznej. Miała ona taki sam skład, jak atmosfera Słońca i zawierała głównie wodór, hel oraz gazy szlachetne. Wskutek dużej siły odśrodkowej, wynikającej z szybszego wirowania planety, oraz w wyniku jej wysokiej temperatury nastąpiło rozwanie jej najbliższych składników, które uleciały w przestrzeń kosmiczną. Sprzyjały temu również słabsze pole grawitacyjne³⁰ oraz znaczna jonizacja Słońca, którego wysokoenergetyczne promieniowanie ultrafioletowe (UV) nie było jeszcze odginane przez pole magnetyczne lub pochłaniane przez filtr ozonowy.

Na drugim etapie rozwoju atmosfery jej skład również w niczym nie przypominał dzisiejszego, natomiast jej kształtowanie się może mieć bezpośredni związek z genezą oceanów. Dynamiczna sekwencja wydarzeń zachodzących w tym czasie na powierzchni Ziemi, z dominującymi wydarzeniami termicznymi wspomaganymi intensywnym wulkanizmem, doprowadzała do wzbogacenia pierwotnej atmosfery w: dwutlenek węgla, azot, parę wodną (typowe składniki gazów wulkanicznych) oraz amoniak, metan i małe ilości innych gazów. W niewielkim stopniu proces odgazowywania wnętrza Ziemi do dzisiaj odbywa się podczas erupcji wulkanicznych. Współczesne wulkany emitują te same gazy i w podobnych proporcjach jak przed miliardami lat. Staje się więc prawdopodobne, że to intensywne odgazowywanie i działalność wulkaniczna w czasach archaicznych ustaliły skład drugiej atmosfery. Gazy emitowane do atmosfery w późniejszym okresie, przeważnie w trakcie wybuchów wulkanicznych, odegrały drugorzędną rolę. Grawitacja planety była wówczas już na tyle duża, że pozwoliła na kumulowanie gazów przy powierzchni. Natomiast brak wolnego tlenu sprawił, iż atmosfera miała charakter redukcyjny lub co najwyżej obojętny. Choć nie wyklucza się obecności niewielkich ilości tlenu uwalnianych podczas fotodysocjacji pary wodnej, to przypuszcza się, że reagował on natychmiast z wodorem, jonami żelaza i innych pierwiastków, nie kumulując się w atmosferze. Zasadnicze zmiany w składzie chemicznym atmosfery nastąpiły dopiero na trzecim etapie, gdy pojawił się w niej wolny tlen i z wysoce redukcyjnego charakteru przeszła na utleniający.

Wśród badaczy panuje powszechna zgoda, że etap ten ma ścisły związek z ewolucją biologiczną. Nastąpił on bowiem z pojawieniem się na naszej

³⁰ Generatorem siły grawitacyjnej Ziemi jest jej płynne jądro, a ponieważ proces jego tworzenia się rozciągnięty był w czasie, również siła pola grawitacyjnego stopniowo wzrastała; wartość zbliżoną do dzisiejszej osiągnęła dopiero po niemal całkowitym zróżnicowaniu się pierwotnej magmy na ciężką, która przemieściła się do wnętrza Ziemi, i lekką, pozostałą przy jej powierzchni; wg Schopfa (1987) mogło to nastąpić około 2,5 mld lat temu, wówczas wyodrębnione było już 3/4 obecnej powierzchni skorupy ziemskiej.

planecie organizmów fotosyntetyzujących, z których sinice uznaje się za głównych architektów ziemskiej atmosfery. Zdaniem Schopfa (2002), organizmy te mogły występować na Ziemi już nawet około 3,5 mld lat temu, a więc pojawiłyby się niemal równocześnie z heterotroficznymi formami życia, uważanymi obecnie za najstarsze organiczne struktury na Ziemi. Należy zatem domniemywać, że te pierwsze heterotrofy musiały powstać w środowiskach izolowanych od wpływu ówczesnej atmosfery.

Przyjmując, że sinice istniały około 3,5 mld lat temu, to proces wzbogacania otoczenia w tlen już wtedy musiał zostać rozpoczęty. Przybrał na sile około 3,0 mld lat temu przez masowo rozrastające się budowle sinicowe – stromatolity i onkolity. W konsekwencji sukcesywnie wzrastająca zawartość tlenu spowodowała spadek zawartości dwutlenku węgla (ryc. 4). Produkcja tlenu, podobnie jak dzisiaj, odbywała się bowiem według reakcji: $\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CH}_2\text{O}$, określanej jako fotosystem II, gdzie tlen uwalnia się jako produkt uboczny syntezy związków organicznych. Dla pierwszych organizmów tlen był toksyczny; najprawdopodobniej wzrost jego poziomu w atmosferze spowodował „stres tlenowy” odpowiedzialny za śmierć wielu organizmów. Formy odporniejsze na działanie tego gazu przetrwały wzrost jego stężenia, umacniając swoją egzystencję. Część z nich zaczęła wykorzystywać go w procesach metabolicznych, uzyskując większe ilości energii z utleniania pierwiastków lub związków nieorganicznych oraz organicznych wytworzonych przez inne organizmy.

Mimo że w ciągu XX w. pogląd uczonych na skład drugiej atmosfery nieco się zmienił i obecnie przychylają się oni do opinii, że jej charakter mógł być obojętny, to jednocześnie zgodnie podkreślają, że atmosfera w początkowej fazie rozwoju, to jest na dwóch pierwszych etapach wyróżnionych powyżej, nie mogła zawierać wolnego tlenu. Pierwsze pierwiastki i związki albo stanowiły relikty kosmicznej powłoki, albo zostały uwolnione do niej z wnętrza Ziemi w wyniku gwałtownego odgazowania płaszcza; ani w jednym, ani w drugim przypadku tlen nie występował. Wskazuje na to skład chemiczny najstarszych skał naszej planety, które nie zawierają jego związków. Poza tym, zdaniem wielu badaczy, to właśnie dzięki zaistnieniu mieszaniny gazów drugiej atmosfery życie w istocie mogło się narodzić, by następnie, po utworzeniu się trzeciej, opuścić oceany i przetrwać w już znanych nam formach. Na takich właśnie założeniach w latach 20. XX w. oparł swoją koncepcję biogenezy Aleksander Oparin. Zgodnie z jego poglądami³¹ pierwotną, silnie redukcyjną atmosferę wyróżniała bogata zawartość

³¹ Oparin nie przeprowadzał żadnych doświadczeń związanych z próbą uzyskania związków organicznych. Zaproponowane przez niego warunki, jakie mogły panować na pierwotnej Ziemi, wynikały z jego czysto teoretycznych rozważań. Niemniej należy podkreślić, że formułując swoją koncepcję początków życia, skorzystał z założeń Darwina, który jako

takich gazów, jak: metan (CH_4), etan (C_2H_6), amoniak (NH_3), para wodna (H_2O), cyjanowodór (HCN), siarkowodór (H_2S) i wodór cząsteczkowy (H_2) oraz niewielkie ilości tlenku węgla (CO). Jego zdaniem taka atmosfera, pozbawiona osłony przed promieniowaniem ultrafioletowym, z silnymi burzami i wyładowaniami atmosferycznymi, mogła z łatwością doprowadzić do zainicjowania samorzutnej syntezy związków organicznych, wymagających oprócz wody i energii powszechnie panujących warunków redukcyjnych. Dziś wiemy, że te założenia tylko częściowo okazały się słuszne. Od drugiej połowy ubiegłego wieku uważa się raczej, że skład wczesnej ziemskiej atmosfery tworzyły głównie dwutlenek węgla i azot; przypominała ona bardziej współczesną atmosferę Wenus i Marsa. Odchodzi się od poglądu Oparina o jej skrajnie redukcyjnym charakterze, zasobnym w CH_4 , NH_3 i H_2 , na rzecz właściwości bardziej utleniających, a ściśle mówiąc obojętnych, ze znacznym udziałem CO_2 i CO (zamiast metanu), N_2 (zamiast amoniaku). Taki hipotetyczny skład atmosfery ziemskiej z mniejszym udziałem związków wodorowych zastosował Stanley L. Miller w swoim doświadczeniu z 1953 r.

Przypuszczenie, że w drugiej atmosferze istniała całkowita przewaga CO_2 , potwierdzone przez wielu autorów, m.in.: Trendalla (1966), Galimova, Kuznetsovą i Prokhorova (1968), Ronova (1972), Sighinolfiego (1974), jest dziś powszechnie akceptowane. Autorzy ci uważają, że ciśnienie CO_2 w atmosferze ziemskiej archaiku utrzymywało się na stałym, o wiele wyższym niż dzisiaj poziomie. Wpływ na to miały głównie intensywne procesy endogeniczne i brak wiązania CO_2 przez organizmy fotosyntetyzujące. Ta znaczna akumulacja dwutlenku węgla mogła w prekambrze doprowadzić do superefektu szklarniowego. Eliminowała zatem występowanie chłódów, umożliwiając przetrwanie życia na młodej Ziemi. Bujnie rozwijające się pod koniec archaiku fotosyntetyzujące sinice sprawiły, że około 2,5 mld lat temu zawartość CO_2 w atmosferze wynosiła zaledwie 75% obecnej zawartości, a pod koniec prekambriu niemal cały dwutlenek węgla został zasymilowany. Tym samym atmosfera systematycznie wzbogacana była w wolny tlen.

W połowie lat 60. ubiegłego wieku Philip Abelson (1966) potwierdził przypuszczenia Millera i wykazał, że nie ma podstaw odwoływania się do występowania amoniaku we wczesnej atmosferze ziemskiej, gdyż związek ten jest bardzo podatny na rozkład pod wpływem promieniowania ultrafioletowego. Panuje przekonanie, że przy braku warstwy ozonowej proces ten rozkładałby amoniak tak szybko, że bardzo wcześnie zniknąłby on z pierwotnej atmosfery ziemskiej. Sugerowanie, że w atmosferze tej występowały

pierwszy w rozważaniach na temat biogenezy „wprowadził” do atmosfery metan i amoniak, wykluczając w niej obecność wolnego tlenu.

duże ilości metanu, również nie znajduje potwierdzenia w ówczynie panujących warunkach. Temperatura na powierzchni Ziemi między 4,6 a 4,0 mld lat wstecz mogła sięgać kilkuset stopni Celsjusza. Wiele wspomnianych zdarzeń termicznych miało miejsce właśnie w tym czasie. Bevan French (1966) uważa, że w takiej sytuacji metan uległby natychmiastowej przemianie w wodę i dwutlenek węgla. Ponadto, istnienie atmosfery $\text{NH}_3\text{-CH}_4$ wymaga wysoce redukcyjnych warunków ze stałym źródłem H_2 , niezbędnym do odnawiania zasobów metanu i amoniaku. Przy braku ciągłej dostawy H_2 , który obecnie stanowi podrzędny składnik emanacji wulkanicznych, silnie redukcyjna atmosfera uległaby szybkiemu zniszczeniu, a dominującą rolę objęłyby CO_2 , N_2 i CO . Jak twierdzą między innymi Miller (1953) oraz Miller i Urey (1959a, b), atmosfera była więc raczej neutralna, ale metan i amoniak, mimo ich niestabilności w warunkach panujących ówczynie na powierzchni Ziemi, w podrzędnych ilościach okazały się niezbędne do powstania pierwotnych form życia. Niezależnie bowiem od tego, czy biosyntezę przeprowadza się w warunkach skrajnie redukcyjnych, czy obojętnych, przypuszczalnie panujących na pierwotnej Ziemi i odtwarzanych laboratoryjnie, związki te odgrywają istotną rolę w procesach wiodących do zapoczątkowania życia w znanej nam postaci.

Według różnych autorów szacunkowa zawartość tlenu w trzeciej atmosferze zmieniała się w różnym stopniu. Znany w nauce efekt Ureya³² – wzajemnej zależności między promieniowaniem kosmicznym rozbijającym cząsteczki pary wodnej (fotodysocjacja) a ilością uwalnianego w ten sposób wolnego tlenu – określa minimalną zawartość tlenu w atmosferze, która pochłania promieniowanie nadfioletowe w takim stopniu, że dalsze wytwarzanie tlenu drogą fotodysocjacji ustaje. Zależność ta polega więc na tym, że im więcej było wolnego tlenu, tym słabsze stawało się promieniowanie UV, ponieważ wyhamowywane było przez tlen, który samo „produkowało” (sprzężenie zwrotne). Samoregulujący się charakter tego procesu doprowadził w końcu do tego, że przy określonej ilości atmosferycznego tlenu jego produkcja wygasła, by ponownie rozpocząć się, gdy stężenie to spadało, na przykład po związaniu tego pierwiastka w procesach utleniania. Obliczenia efektu Ureya (1959a, b), dokonane przez Berknera i Marshalla (1965, 1966), prowadzą do wniosku, że O_2 generowany przez dysocjację fotochemiczną w pierwotnej atmosferze byłby samoregulowany przy 0,001% poziomie obecnej jego zawartości w atmosferze. Nie wiadomo, jak długo w atmosferze utrzymywał się stan równowagi związany z efektem Ureya. Szacuje się natomiast, że z rozwinięciem się nowego źródła tlenu – organizmów fotosyntety-

³² Określenie to przyjęto w świecie nauki na cześć odkrywcy tego procesu, amerykańskiego chemika, laureata Nagrody Nobla – Harolda C. Ureya.

tyzujących – jego udział w atmosferze od około 2,7 mld lat temu systematycznie wzrastał (Rutten 1970).

Stanley (2005) uważa, że zawartość wolnego tlenu 2,3 mld lat temu osiągnęła już 1–2% dzisiejszej jego zawartości w atmosferze³³, a 1,9 mld lat temu mogła wynosić już 10–15%. Igamberdiev i Lea (2006) twierdzą natomiast, że jeszcze w atmosferze najmłodszego proterozoiku (1,0–0,9 mld lat temu – neoproterozoik) zawartość tlenu nie przekraczała 2–3% jego dzisiejszego poziomu w atmosferze. Z kolei Schopf (2002) na mniej niż 1% określił ją jeszcze dla atmosfery z około 700 mln lat temu. Nie brakuje też sugestii, iż pod koniec proterozoiku w atmosferze mogło być już tyle tlenu, ile mamy go dzisiaj. Jednak nawet jeśli przyjmiemy, że pod koniec prekambriu, około 700 mln lat temu, pierwiastek ten występował w atmosferze w obecnej ilości, to i tak jego kumulacja odbywała się bardzo wolno – zajęłaby bowiem 2,8 mld lat (w naszej skali trwałoby to ponad 7 miesięcy), licząc od pojawienia się organizmów fotosyntetyzujących, czyli od 3,5 mld lat wstecz. Miliard lat później fotoautotrofy dominowały już na rozrastających się szelfach kontynentalnych, tworząc na nich potężne budowle organiczne – stromatolity. Musiały więc produkować znaczne ilości tlenu. Ta pozornie wolna produkcja tego gazu wynika jednak z jego dużej aktywności i nie możemy w prosty sposób łączyć wzrostu jego ilości ze zwiększeniem natężenia fotosyntezy.

W pierwotnym oceanie znajdowało się wiele zredukowanych związków, takich chociażby, które zawierały żelazo. Przed pojawieniem się tlenu, uwalniane w procesach magmowych żelazo dwuwartościowe krążyło w wodzie w postaci rozpuszczonej. Dopiero gdy w wodzie wystąpił ten gaz, żelazo łączyło się z jego cząsteczkową postacią i stawało się trójwartościowym kationem – Fe^{3+} . Schopf (2002) określa ten etap terminem „rdzewienie Ziemi”, a dowodów na to dostarczają bogate w tlenek żelaza (hematyt – Fe_2O_3) wstęgowe rudy żelaziste, określane skrótem BIF (z ang. Banded Iron Formation). Powszechnie występowały one między 3,0 a 2,0 mld lat temu (znane od 3,75–1,75 mld lat wstecz). Składały się one z naprzemianległych warstw osadu bogatego i ubogiego w żelazo. Jednak cały tlen, produkowany przez sinice w ich początkowym okresie bujnego wzrostu, wiązany był przez występujące w praoceanie zredukowane związki nie tylko żelaza. W zasadzie cała zawartość praoceanu wykazywała niedobór tlenu. Jego większość natychmiast zostawała pochłonięta, zanim dotarła do atmosfery. Ponadto warto uświadomić sobie, że na każdy mol powstałego na skutek fotosyntezy tlenu przypada mol organicznego węgla, który w „normalnych” warunkach, po śmierci organizmu może ulec utlenieniu. Jedynie uwięzienie tego węgla

³³ Zawartość gazów w obecnej atmosferze wynosi: 78,08% – N_2 , 20,95% – O_2 , 0,93% – Ar, 0,0315% – CO_2 , 0,0018% – Ne, 0,0005% – He, 0,0001% – Kr, 0,00004% – H_2 , 0,00001% – CO, 0,000009% – Xe.

w skałach węglanowych (wapieniach) lub pogrzebanie go w postaci znanego nam węgla zapewnią tlen dla atmosfery (Walker 1977). Na tej podstawie łatwo stwierdzimy, że przyrost tego pierwiastka w atmosferze zależy jeszcze od różnicy między jego produkcją a pośmiertnym zużyciem na destrukcję materii organicznej. Zatem, fakt 21-procentowej zawartości tlenu we współczesnej atmosferze świadczy o znacznej skali fotosyntezy, zwłaszcza że obecnie, z łącznej ilości tlenu powstałego w tym procesie, jedynie 5% stanowi jego wolna postać atmosferyczna i oceaniczna. Ponad połowa produkcji tego gazu (56%) zawarta jest w SO_4^{2-} , a pozostałe 39% w Fe_2O_3 (Schidlowski i in. 1975). Na pierwotnej Ziemi dopiero po zatrzymaniu lub co najmniej znacznym zwolnieniu tych wszystkich reakcji wynikających z braku substratów lub pogrzebania węgla organicznego tlen miał szansę przeniknąć do atmosfery. Zjawiska te wyjaśniają również, dlaczego przy tak ogromnej jego nadprodukcji to azot stanowi główny składnik dzisiejszej atmosfery. Otóż pierwiastek ten, mający duży udział w wyziewach wulkanicznych, w przeciwieństwie do tlenu nie bierze udziału w żadnych istotnych reakcjach chemicznych i przypuszczalnie ulega ciągłej akumulacji w atmosferze.

Wiele więc wskazuje na to, że atmosfera w początkowej historii Ziemi nie zawierała wolnego tlenu. Do najczęściej wymienianych dowodów wskazujących na jej redukcyjny charakter jeszcze około 2,2 mld lat temu należą – uraninit (UO_2) i piryt (FeS_2), które obficie występują w lądowych skałach okruchowych starszych niż 2,1–2,3 mld lat. W skałach młodszych, w osadach terygenicznych, związki te nie pojawiają się, gdyż uraninit w obecności wolnego tlenu ulega przeobrażeniu w U_3O_8 lub inne tlenki, a produktami utleniania pirytu są głównie tlenki i wodorotlenki żelaza oraz siarczany. Piryt co prawda może się tworzyć nawet współcześnie, zarówno na dużych, jak i małych głębokościach, ale zawsze tylko wtedy, kiedy w środowisku zawartość tlenu jest bardzo niska lub gdy go brak, czyli w warunkach redukcyjnych. Taki proces nigdy nie zachodzi na powierzchni lądu.

Dobrym wskaźnikiem redukcyjnej atmosfery jest też wysoki stosunek $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ w produktach wietrzenia i cementach liczących około 2,2 mld lat. Generalnie udział żelaza dwuwartościowego wykazuje wzrost w coraz starszych skałach osadowych. Również wysoki stosunek greenalit (Fe^{2+} , Fe^{3+}) $_{2-3}[\text{Si}_2\text{O}_5](\text{OH})_4$ /glaukonit (K , Na , Ca) $(\text{Fe}$, Al , Mg , $\text{Fe})_2[(\text{OH})_2/(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_{10}] \times n \text{H}_2\text{O}$ potwierdza znikome ilości lub brak tlenu w pierwotnej atmosferze. Utleniony krzemian żelaza (glaukonit) jest rzadki w skałach starszych niż 1,0 mld lat. Greenalit występuje obficie jedynie w skałach przedfanerozoicznych; jest głównym składnikiem żelazistej formacji Gunflint (południowe Ontario), datowanej na 2,0 mld lat. W przeciwieństwie do glaukonitu greenalit zawiera więcej żelaza dwu- niż trójwartościowego.

Na sugerowany przez badaczy redukcyjny charakter pierwotnej atmosfery wskazują również niskie i zmieniające się z czasem stopnie utlenienia

europu (Eu) i ceru (Ce). W skałach wczesnego proterozoiku (ok. 2,3 mld lat temu) dominuje ^{2}Eu , w młodszych (1,9–0,8 mld lat temu) obserwuje się przejście od ^{2}Eu do ^{3}Eu . Podobnie zmienia się stopień utlenienia ceru. Najbardziej zredukowane postacie tych pierwiastków odnotowuje się w skałach dolnego archaiku, a bardziej utlenione w skałach górnego proterozoiku. Także wysoki stosunek Mn/Fe w prekambryjskich formacjach żelazistych (0,025), który nigdy nie jest taki sam, jak dla środowisk utleniających (0,009), zdaje się uwiarygodniać sugerowany skład prekambryjskiej atmosfery. Pewnych przesłanek wskazujących na brak tlenu w archaiku, a właściwie na jego obecność w proterozoiku, dostarczają także skamieniałości.

Otóż, w kopalnych sinicach datowanych na około 2,2 mld lat pojawiają się heterocysty – komórki o zgrubiałych ścianach, w których odbywała się redukcja azotu do amoniaku, przeprowadzana przez nitrogenazę – enzym, którego działanie hamuje obecność tlenu (Dzik 1992). Grube ściany niektórych komórek sinic miały zapewne chronić nitrogenazę przed szkodliwym działaniem tego gazu. Sinice starsze niż 2,2 mld lat nie miały heterocyst, zatem pojawienie się ich u osobników stratygraficznie młodszych może sugerować występowanie w wodach oceanicznych i atmosferze tlenu w stężeniu odczuwalnym przez te organizmy³⁴.

Składy atmosfery i wód oceanicznych w prekambrze ewoluowały od warunków redukcyjnych do utleniających. Za punkt zwrotny tego przejścia przyjmuje się czas około 2,2 mld lat temu (na naszym kalendarzu byłby to 8 lipca), dokumentowany powszechną, a przez to najłatwiej dostrzegalną depozycją utworów trójwartościowego żelaza. W proterozoiku, w skałach lądowego pochodzenia młodszych od 1,9 mld lat, obecność tlenków żelaza skłoniła niektórych badaczy do twierdzenia, że ilość tlenu w atmosferze stanowiła 10–15% dzisiejszej zawartości. Nieco wcześniej, bo około 2,0 mld lat temu, pojawiły się pierwsze organizmy eukariotyczne, a około 1,0 mld lat temu pierwsze zwierzęta. Na lądach zaczynają tworzyć się czerwono zabarwione hematytem osady klastyczne przypominające współczesne gleby laterytowe czy śródziemnomorską *terra rosa* (czerwoną ziemię).

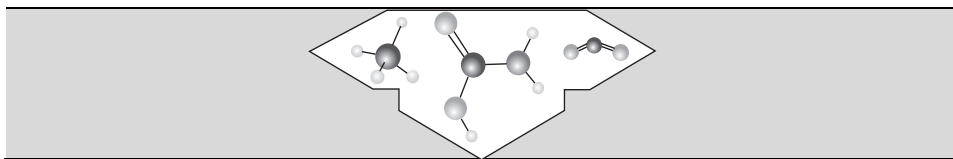
Mimo że za najważniejsze źródło tlenu atmosferycznego uznaje się organizmy fotosyntetyzujące, rozważa się jednak jeszcze dwa nieorganiczne sposoby jego uwalniania. Musiały istnieć one już wcześniej, ponieważ uwalnianie tego pierwiastka na drodze fotosyntezy wymaga jego obecności w środowisku. Na jednym z etapów syntezy chlorofilu potrzebny jest tlen w postaci molekularnej. Pierwszym z tych sposobów jest, wspomniana, dysocjacja wody pod wpływem promieniowania UV. Dzięki temu, że tlen jest szesnastokrotnie cięższy od wodoru, pozostawał przy powierzchni Ziemi,

³⁴ Budowle sinicowe rozwijały się w płytkich wodach, na szelfach i w strefach pływów, czyli bogatych w tlen.

podczas gdy wodór uciekał z atmosfery. Umożliwiło to jego początkową kumulację. Niestety, choć warunki panujące na pierwotnej Ziemi bardzo sprzyjały fotodysocjacji wody, niewielka wydajność tego procesu sprawiła, że ilość owego gazu uzyskana w ten sposób nie powinna być brana pod uwagę przy ogólnym jego bilansowaniu. Nawet gdyby proces ten trwał do dziś, a tak nie jest, gdyż warstwa ozonowa hamuje przenikanie promieni UV, ilości tlenu uzyskane wyłącznie tą drogą stanowiłyby nikły procent obecnej jego zawartości w atmosferze.

Drugi, również bardzo wczesny sposób przechodzenia tlenu do atmosfery i hydrosfery to jego uwalnianie w wyniku działania silnie redukcyjnych gazów na krzemiany lub węglany pochodzenia magmowego. Rozmiary tych procesów pozostają nieznane, a ich wkład w nasycenie tlenem atmosfery wydaje się być nieznaczny nawet w porównaniu z fotodysocjacją wody. Natomiast, mimo że każda komórka produkowała znikome ilości tego pierwiastka, łączny metabolizm ogromnej liczby komórek (np. w budowlach sinicowych), dominujących od około 3,0–1,75 mld lat temu, spowodował zmiany w atmosferze Ziemi, ustalając jej skład pierwiastkowy, a być może i procentowy na ten zbliżony do dzisiejszego. W tym czasie bowiem z jednej strony, w wyniku fotosyntezy, wzrastała zawartość tlenu w atmosferze, z drugiej strony te same organizmy przyczyniały się do zmniejszania zawartości dwutlenku węgla. Dziś uważa się nawet, że istotna część węgla z atmosferycznego CO₂ została zasymilowana przez ówczesny świat organiczny, a węgiel wbudowany w jego struktury. Znaczyłoby to, że biomasa, jaka wówczas się wytworzyła, była największą z potencjalnie możliwych do powstania. Dziś, gdy znaczne ilości węgla zostały uwięzione w skamieniałościach i skałach węglanowych, do podobnego zdarzenia dojść raczej nie może. Nie grozi nam zatem „przeludnienie” (przepełnienie organizmami żywymi); w każdym razie dopóki związany węgiel w całości nie zostanie uwolniony, a to wydaje się raczej niemożliwe.

Gdy zawartość tlenu w atmosferze ustaliła się na odpowiednio wysokim poziomie, pozwalającym na powstanie warstwy ozonowej, możliwe też stało się opanowanie lądów przez organizmy żywe. Tą graniczną wartością, według Igamberdieva i Lea (2006), było 10-procentowe stężenie dzisiejszej zawartości tego gazu, które uzyskane zostało w sylurze (ok. 420 mln lat temu – 29 listopada w naszym kalendarzu). Na ląd „wyszły” wówczas pierwsze rośliny naczyniowe (Rhyniophyta), a wkrótce po nich zwierzęta lądowe (pajęczaki, wije). Natomiast 100% dzisiejszej zawartości tlenu, według wspomnianych autorów, atmosfera osiągnęła najprawdopodobniej pod koniec dewonu (350 mln lat temu – „3 grudnia”). Wtedy na lądach pojawiły się liczne drzewiaste formy paprotników oraz lądowe kręgowce, czyli najstarsze płazy.



ZIEMSKA PRACOWNIA

Gdzie eksperymentowała „laborantka” Ziemia?

Jak wspomniałem, obecnie przeważa twierdzenie, że znane nam życie nie musi być wyjątkowe w kosmosie, a w Układzie Słonecznym wciąż dopuszcza się możliwość jego istnienia na przykład na Marsie lub jego księżycach. Postępy nauk ścisłych ostatnich dziesięcioleci, w tym liczne odkrycia z zakresu biochemii, biologii czy paleontologii, dają nam już pewne wyobrażenie o tym, jak organizmy żywe, zbudowane z ogromnej liczby związków organicznych (oczywiście zależnej od stopnia skomplikowania organizmu), mogły powstać z materii nieorganicznej tu na Ziemi. Niestety, postęp nauk i rozwój metod badawczych paradoksalnie nie prowadzi do ostatecznego rozwiązania intrygującego nas problemu. Niemniej przyczyniając się do tworzenia różnych hipotez, przybliża nas do uzyskania odpowiedzi na pytanie o pochodzenie życia w ogóle. I choć uczeni nie upierają się już, że do jego narodzin potrzebna była „ciepła kałuża”, nadal istnieją rozbieżności w interpretacjach dotyczących środowiska, w którym dokonała się biogeneza i warunków towarzyszących narodzinom pierwszych organizmów. Główne kontrowersje związane są z trzema kwestiami: jaki był mechanizm biogenezy, czy przebiegała ona „na sucho”, czy „na mokro”, na powierzchni Ziemi (w oceanach czy na lądach) czy może w atmosferze?

Zdecydowana większość badaczy przyjmuje, że rola kolebki życia przypadła oceanom. Środowisko to, a zwłaszcza przypowierzchniowe partie wody do głębokości 10–15 m, wydaje się być najkorzystniejszym dla reakcji abiotycznej biogenezy. Atutem tej strefy wód jest to, że do tej głębokości docierały duże ilości energii niezbędnej do zainicjowania syntezy związków organicznych, chociażby z wyładowań elektrycznych i promieniowania UV.

Poza tym taki słup wody był wystarczający, aby wygasić nadmiar promieni UV szkodliwych dla tworzących się związków organicznych. Istnieje więc duże prawdopodobieństwo, że biosynteza na tej głębokości mogła zakończyć się powodzeniem. Zsyntetyzowane biomolekuły, biernie opadając, miały realne szanse na szybkie znalezienie się poza zasięgiem szkodliwego dla nich promieniowania UV.

Nie brakuje też koncepcji dotyczących głębokomorskich początków życia. Według nich na ówczesnej Ziemi ogromnych ilości energii dostarczały podmorskie wulkany i towarzyszące im wypływy wód hydrotermalnych³⁵, znajdujące się na znacznych głębokościach. Nawet dziś miejsca te nie zawierają chociażby minimalnych ilości wolnego tlenu i zabójczego promieniowania ultrafioletowego. Charakteryzują się za to szerokim zakresem temperatur, pozwalającym na wiele możliwości rozegrania się głównych zdarzeń ewolucyjnych. Miejsca te obfitują również w kompletne zestawy minerałów, w tym fosforu niezbędnego dla organizmów, oraz minerałów ilastych, stanowiących doskonale podłoże do wzrostu dużych cząsteczek organicznych. Do dzisiaj z powodzeniem żyją w takich miejscach bakterie, tak zwane ekstremofile, które przystosowały się do wyjątkowo skrajnych warunków termicznych i chemicznych. Birger Rasmussen z Wydziału Geologii i Geofizyki Uniwersytetu Zachodniej Australii znalazł szczątki organizmów, które 3 mld 235 mln lat temu żyły kilometr pod powierzchnią wody (Rasmussen 2000). Na opublikowanych w „Nature” zdjęciach spod mikroskopu elektronowego wyraźnie widać ich nitkowatą strukturę. Choć nie zachowały się same komórki, lecz jedynie ich „cienie” (mineralne osłonki), widać, że były to pozbawione jądra komórkowego organizmy prokariotyczne. Nie zważając na niegościnne im środowisko morskich głębin, zamieszkały one w bezpośrednim sąsiedztwie wylotów hydrotermalnych. Z badań podjętych przez tego uczonego wynika, że woda, która omywała kolonie bakterii, osiągała temperaturę bliską 100°C i obfitowała w związki ciężkich metali: miedzi, cynku, kobaltu, niklu, żelaza i siarki.

Za środowiska najbardziej zbliżone warunkami do tych, jakie panowały w praoceanie, współcześnie uważa się jeziora kraterów wulkanicznych. Ich badaniem zajmują się naukowcy z Instytutu Paleobiologii PAN, Instytutu Biogeochemii Uniwersytetu Hamburskiego oraz Instytutu Technicznego w Darmstadt. Według tego zespołu naukowców woda owych jezior przypomina pierwotny ocean Ziemi zarówno pod względem składu chemicznego

³⁵ Są to ujścia źródeł podmorskich, przez które ze szczelin w skorupie ziemskiej wypływają tzw. roztwory juwenilne, czyli gorące wody bardzo bogate w związki wypłukane ze skał płaszczu Ziemi (ang. *vent lub smoothers* – kominy, szczególnie licznie występujące w rozległych spekaniach skorupy oceanicznej, wzdłuż grzbietów śródoceanicznych).

go, jak i własności fizycznych. Uważają więc, że badając te zbiorniki wodne, będą mogli odtworzyć genezę i historię praoceanu oraz warunki panujące w nim w czasach, gdy rozwijały się zaczątki życia.

Dziś, z rozwojem nowej dyscypliny nauki, jaką jest geologia prekambriu, zmienia się pogląd na lokalizację początków życia na Ziemi. Pod uwagę bierze się również głębinowe zbiorniki wody pod lodami Antarktydy, szczeliny w lodowcach w Arktyce Kanadyjskiej czy głębokie warstwy litosfery. Zatem poligonami do przyszłych badań życia stają się ekstremalne środowiska przyrodnicze naszego globu.

Wśród większości naukowców panuje zgoda, że samorodne powstanie organizmów żywych w warunkach panujących współcześnie jest niemożliwe. Jako pierwszy do takiego wniosku doszedł już Darwin w połowie XIX w. Według niego każdy przypadkowo zsyntetyzowany współcześnie związek organiczny bądź zostałby natychmiast skonsumowany, bądź rozłożony przez występujący w biosferze wolny tlen. Wspólną cechą związków organicznych budujących istoty żywe zasiedlające naszą planetę jest ich wysoce redukcyjny charakter, czyli niedosycenie tlenem. Dlatego po śmierci organizmu, jeżeli działa na niego wolny tlen atmosferyczny, dochodzi do szybkiego utlenienia i rozkładu związków organicznych na składniki nieorganiczne.

Kiedy „laborantka” Ziemia ożywiła swoją działalność?

Częściowo już odpowiedzieliśmy na to pytanie. Życie zaistniało, kiedy powszechnie zapanowały warunki redukcyjne. Jednakże wiek Ziemi szacuje się na 4,567 mld lat, a początek atmosfery tlenowej datuje się na 2,2 mld lat temu. Kiedy zatem podczas tych najwcześniejszych ponad 2 mld lat istnienia Ziemi powstały organizmy żywe?

Na to pytanie jednoznacznie nie da się odpowiedzieć. Mikrostruktury uznawane w latach 90. XX w. (Schopf 1993) za ewidentne dowody na występowanie skamieniałości w skałach datowanych na 3,465 mld lat (w naszej skali ok. 28 marca) są obecnie podważane. Z doniesieniami Schopfa najczęściej polemizują Brasier i in. (2002, 2005, 2006). Autorzy ci uważają, że „komórki” pochodzące z północno-zachodniej Australii, z formacji skalnej znanej jako czert Apex, mogą być nieorganicznego pochodzenia. Według tych autorów struktury czertu Apex można interpretować jako obiekty powstałe w wyniku nieorganicznej syntezy z hydrotermalnych roztworów krążących w systemach szczelin tektonicznych. Ich zdaniem wszystkie opisane formy

morfologiczne (ang. *morphospace*), poddane krytycznej analizie w szeroko rozumianym kontekście środowiskowym, z jednoznacznym odrzuceniem alternatywnych niebiologicznych hipotez, stają się co najwyżej domniemanymi organizmami żywymi. W swoich rozważaniach Brasier i in. (2006) idą jeszcze dalej, twierdząc, że w ogóle trudno będzie uzyskać wiarygodne dowody na istnienie skamieniałości starszych od 3,0 Ga. Rozpoznanie tak starych struktur wymaga bowiem szczególnej ostrożności podczas ich badania, ponieważ niektóre formy, na przykład endolityczne mikrokanaliki, nierzadko traktowane jako organicznego pochodzenia, mogą okazać się tworami powstałymi w wyniku syngenetycznej selekcji ziaren osadu i/lub wielokrotnych geochemicznych przemian. Zwraca też uwagę, że by zmniejszyć prawdopodobieństwo pomyłki, chociażby takiej, która miała miejsce w przypadku sensacyjnych doniesień o marsjańskich „bakteriach”, należy wystrzegać się szukania odpowiedzi na pytanie, co dane struktury przypominają, ale czym one są? Musimy mieć również na uwadze fakt, że w skałach archaicznych mogą występować struktury organiczne i różne biomarkery powstałe w wyniku działalności późniejszych (młodszych) organizmów, na przykład beztlenowych bakterii (typ *Proteobacteria*) lub innych euendolitów.

Zdaniem Brasiera i in. (2006), przy dzisiejszym stanie wiedzy za pewne skamieniałości można uważać tylko te datowane na około 2,6 Ga (w naszej skali na ok. 7 czerwca), prowadzące autotroficzny tryb życia. Natomiast dowody na obecność mikroplanktonu w skałach datowanych na 3,5 Ga wciąż są niewystarczające, choć nie wyklucza się, że heterotroficzne organizmy hipertermofilne, endolityczne lub żyjące w skorupie ziemskiej na dużych głębokościach mogły już istnieć (Brasier i in. 2006).

Chcąc zachować w miarę pełen wachlarz poglądów na temat czasu pojawienia się najstarszych organizmów żywych na Ziemi, należy wspomnieć o takich głosach, zgodnie z którymi życie na naszej planecie mogło pojawić się nawet wcześniej niż zakładał Schopf (tj. przed 3,5 mld lat temu). Wyniki niektórych badań i pośrednie dowody życia w postaci osadów, prawdopodobnie pochodzenia organicznego, odsuwają to wydarzenie do 3,8 mld lat wstecz. W skałach tego wieku, w południowo-zachodniej Grenlandii, odkryto najstarszy węgiel o składzie sugerującym jego częściowo organiczną naturę. Chociaż analizując skład izotopowy węgla, naukowcy potrafią rozpoznać, czy brał on udział w procesach życiowych, to nie możemy jednoznacznie wykluczyć niebiologicznego pochodzenia tej węglistej substancji³⁶.

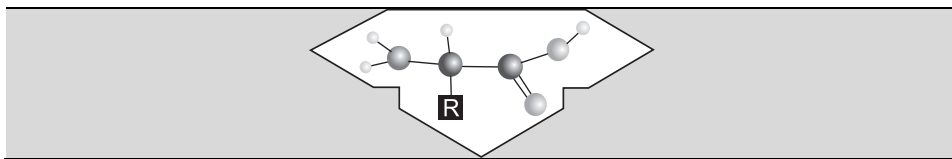
³⁶ Odróżnienie związków organicznych od archaicznych organizmów żywych nie jest łatwe. Chcąc uznać nasze okazy za skamieniałości (a więc zachowane w stanie kopalnym szczątki dawnego organizmu), muszą one spełniać kilka warunków. Schopf (2002) podaje, że struktury te, oprócz węglistej substancji, powinny m.in. odznaczać się złożoną budową, wy-

Nie przeszkadza to jednak zwolennikom bardzo wczesnego pojawienia się życia na Ziemi, twierdzić, że już wtedy funkcjonowały najprostsze formy życia. Jednakże w takiej sytuacji, jeśli przyjmujemy, że rzeczywiście te najstarsze związki organiczne mają organiczny rodowód, niewykluczone jest, że okres biogenezy, aby doprowadzić do pojawienia się organizmów produkujących te związki, rozpocząć się musiał około 4,0 mld lat temu. Trwałby zatem około 200 mln lat. Zdaniem niektórych badaczy i tak wydaje się on zbyt krótki. Częsteczki organiczne, pomimo swej zdolności do powiększania stopnia złożoności, potrzebowały o wiele więcej czasu, by w wyniku wzajemnych reakcji stworzyć bazę do dalszej ewolucji prebiologicznej.

Wydarzenia termiczne spowodowane niszczycielską siłą upadków planetoid nie wykluczają zatem hipotezy o wczesnym (przynajmniej około 3,8 mld lat temu) powstaniu życia. Choć miało ono niewielkie szanse na przetrwanie, to jednak w pewnych miejscach na Ziemi mogło oprzeć się zagładzie. Łącząc dawne opinie z poglądami współczesnych astrobiologów, można przyjąć, że powstało ono w sprzyjających warunkach, nawet znacznie ponad 4,0 mld lat temu, natomiast okresy wyparowań praoceanu przetrwało chociażby w głębi Ziemi. Przesłanek ku takiemu myśleniu dostarczą nam odkryte w Szwecji, w litosferze na głębokości kilku kilometrów, nieznane dotąd mikroorganizmy (<http://news.astronet.pl/news.cgi?522>). Głębiny skalne mogłyby więc ochronić zainicjowane życie.

W związku z nowymi odkryciami obecnie nie wyklucza się, że próby biogenezy pojawiały się nawet wcześniej, od około 4,6 do 4,0 mld lat temu, zwłaszcza że substancje organiczne są w stanie powstać ze stosunkowo prostych reakcji. Jednak brak tak starych skał definitywnie pozbawia nas możliwości poznania najstarszych etapów tego procesu. W związku z tym wydaje się, że określenie, kiedy tak naprawdę pojawiło się życie na Ziemi, pozostanie tylko w sferze hipotez.

stępować w zróżnicowanych pod względem wielkości i kształtu okazach oraz występować zespołowo.



WŁAŚCIWOŚCI ŻYWEJ MATERII

Chcąc poznać, jak spontaniczne oddziaływania stosunkowo prostych cząsteczek rozpuszczonych w praoceanie prebiotycznego świata doprowadziły do powstania wspólnego przodka, powinniśmy najpierw określić strukturę i charakterystyczne właściwości żywej materii. Dopiero bliższe poznanie tych właściwości uzmysłowi nam, jak nieskomplikowana jest budowa najprostszych komórek i jak niewielkie jest minimum wymagań dla zaistnienia życia. Choć trudno jeszcze jednoznacznie określić, gdzie i kiedy powstały pierwsze organizmy żywe, to łatwo już wyobrazić sobie, jak mogło dojść do ich powstania.

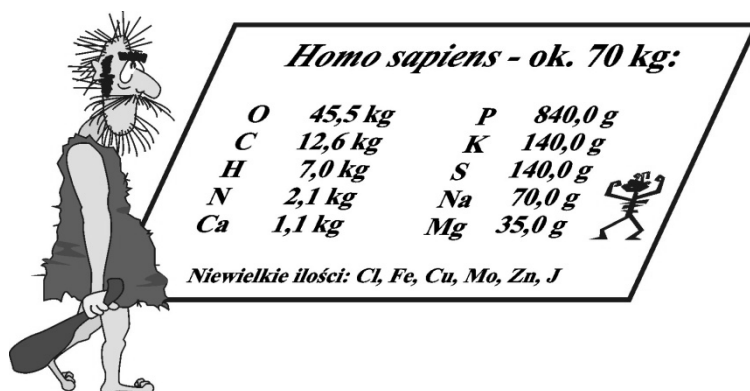
Imperium życia

Skład chemiczny żywych organizmów jakościowo zupełnie różni się od kompozycji elementów środowiska fizycznego, w którym te organizmy egzystują. Układy żywe w większości zbudowane są z organicznych związków węgla i azotu, w których węgiel znajduje się w stanie względnego zredukowania. Spośród występujących w skorupie ziemskiej 100 pierwiastków chemicznych 25 okazuje się niezbędnymi dla budowy i funkcjonowania żywych organizmów (tab. 1), a tylko 16 (C, H, O, N, P, S, Na, K, Mg, Ca, Cl, Fe, Mn, Co, Cu, Zn) znajduje się w organizmach wszystkich klas/gromad.

Dziewięć pierwiastków: fosfor, siarka, sód, potas, magnez, wapń, chlor, żelazo, krzem, to tak zwane makroelementy, które pojawiają się w większych stężeniach. Pozostałe pierwiastki: mangan, kobalt, miedź, cynk, molibden, wolfram, wanad, chrom, nikiel, selen, fluor, jod, znajdują się w ilościach śladowych i określa się je jako mikroelementy. Węgiel, wodór, tlen

Tabela 1. Udział ważniejszych pierwiastków w budowie organizmów żywych i skorupy ziemskiej (wg Lehningera 1979)

Pierwiastki wchodzące w skład żywej materii	Udział niektórych pierwiastków w składzie skorupy ziemskiej	
Główne składniki materii organicznej: C, H, O, N, P, S	O	62,50 [%]
	Si	21,20
	Al	6,47
	Na	2,64
Makroelementy: Na, K, Mg, Ca, Cl, Fe, Si	Ca	1,94
	Fe	1,92
	Mg	1,84
	P	1,42
Mikroelementy: Mn, Co, Cu, Zn, Mo, W, V, Cr, Ni, Se, F, I	C	0,08
	N	0,0001



Ryc. 5. Wagowy udział głównych pierwiastków w masie przeciętnego człowieka (wg Raymonda 2007); rycina zawiera kliparty CorelDRAW®9

i azot stanowią pierwiastki najobficiej występujące w żywych organizmach. Współtworzą one bowiem niemal 99% masy większości komórek (tab. 2). W przypadku człowieka ważącego około 70 kg masa tych czterech pierwiastków wynosi 67,5 kg (ryc. 5).

Tabela 2. Przeciętny skład chemiczny organizmów lądowych według Trojana (1978)
[% żywej masy]

Pierwiastek	% masy	Pierwiastek	% masy
O	70,00	Ti	0,0008
C	18,00	Zn	0,0003
H	10,00	Li	0,0001
N	0,50	Cu	0,0001
Ca	0,30	Ba	0,0001
K	0,30	F	0,00008
Si	0,15	Br	0,00008
Mg	0,07	Rb	0,00005
P	0,07	Se	0,00005
S	0,05	Ni	0,00003
Cl	0,04	As	0,00003
Na	0,02	Mo	0,00002
Al	0,02	Co	0,00001
Fe	0,02	J	0,00001
Mn	0,007	Hg	0,0000001
Sr	0,001	Ra	$0,1 \times 10^{-12}$

Natomiast w skorupie ziemskiej najbardziej rozpowszechnione są: tlen, krzem, glin, sód (tab. 1). Zatem, udział tych pierwiastków w budowie żywych organizmów, poza tlenem, nie jest współmierny do ich rozpowszechnienia w skorupie ziemskiej. Fakt ten sprawił, że wśród niektórych badaczy po raz kolejny odżył pogląd, iż życie musiało zrodzić się z zarodków przyniesionych na Ziemię przez meteoryty, które w dalekiej przeszłości „zaraziły” naszą planetę. Bo czyż skład chemiczny planety nie powinien znaleźć odbicia w biologicznej strukturze jej mieszkańców? Pytają i argumentują jednocześnie zwolennicy panspermii – poglądu chronologicznie najstarszego, formalnie wyrażającego koncepcję biogenezy, sformułowanego przez Svanthe’a Arrheniusa w roku 1908. Dodatkowym argumentem dla zwolenników tego poglądu jest fakt występowania uderzająco zbliżonego udziału procentowego głównych pierwiastków w organizmach żywych i w całym Układzie Słonecznym. Najczęstszym pierwiastkiem w naszym układzie jest bowiem wodór, tlen zajmuje pozycję trzecią. Pierwiastki te łącznie z drugim w kolejności helem stanowią 98% całkowitej masy Układu Słonecznego; składnikami czwartym i piątym są odpowiednio węgiel i azot.

Postęp nauk przyrodniczych w ostatnich dziesięcioleciach dał jednak możliwość nowego spojrzenia na interesujące nas zagadnienie. Wśród zaj-

mujących się nim badaczy szczególnie liczną okazała się grupa zwolenników koncepcji ziemskiego pochodzenia życia. Ich zdaniem mogło ono powstać ze związków organicznych abiotycznego pochodzenia bez żadnej interwencji z zewnątrz. Z szeregu doświadczeń wynika, że wszystkie proste związki organiczne, komponenty żywych organizmów, mogą zaistnieć bez ich udziału, a jedynie w wyniku działania procesów fizykochemicznych natury abiotycznej. Co więcej, życie zdaje się jawić jako kolejna faza ewolucji materii.

Tabela 3. Procentowy udział głównych składników materii organicznej w makromolekułach wybranych organizmów (Schopf 2002, uproszczony)

Główne składniki materii organicznej						Składniki organizmów żywych	Udział składników w wybranych organizmach			
Węgiel	Wodór	Tlen	Azot	Fosfor	Siarka		Salata	Grzyb	Bakteria	Krowa
	H	O				Woda	95	90	75	74
C	H	O	N		S	Białka	1,3	3,6	17,5	19,6
C	H	O				Tłuszcze	0,4	0,4	2,5	4,2
C	H	O				Węglowodany	2,1	5,1	1,3	0
C	H	O	N	P		DNA, RNA, ATP	1,2	0,9	3,7	2,2

Trudno podważyć fakt, że organizmy żywe w ponad 99% zbudowane są z: C, H, O, N – CHON (tab. 3). Skoro pierwiastki te nie występują w przewadze na Ziemi i jeśli zakładamy, że nie przywędrowały one z kosmosu, to mamy prawo także sądzić, iż związki z nich utworzone muszą ujawniać wyjątkową przydatność molekularną w tych wszystkich procesach, które razem tworzą stan materii zwany życiem. Czy tak rzeczywiście jest? Okazuje się, że (1) pomiędzy CHON bez trudu zachodzą reakcje z trwałymi wiązaniami kowalencyjnymi, to jest takimi, w których 1, 2 lub 3 elektrony są wspólne dla związanych atomów; cecha ta pozwala im uzupełniać swe zewnętrzne powłoki elektronowe. (2) CHON są najlżejszymi spośród pierwiastków zdolnych do tworzenia wiązań kowalencyjnych. Okazuje się, że w żywych organizmach nastąpił dobór takich pierwiastków, jakie zdolne są wytwarzać najmocniejsze wiązania kowalencyjne, ponieważ siła takich

wiązań pozostaje w odwrotnym stosunku do masy związanych atomów. (3) atomy węgla wykazują szczególnie znamienne właściwość przejawiającą się we wzajemnym współdziałaniu, z wytwarzaniem między sobą trwałych wiązań, w tym kowalencyjnych. Każdy atom tego pierwiastka jest w stanie utworzyć ten typ wiązań nawet z czterema innymi atomami węgla. Ta właściwość sprawia, że (4) z połączonych kowalencyjnie jego atomów może kształtować się teoretycznie niezmierzona różnorodność szkieletów dla różnych cząstek organicznych. Co więcej, proste i rozbudowane łańcuchy węglowe zdolne są przyłączać wiele różnego rodzaju grup funkcyjnych, co zwielokrotnia i tak już ogromną liczbę związków organicznych. Te zaś (5) przyjmują wokół każdego atomu węgla konfigurację tetraedryczną. Różne cząsteczki tego typu muszą wykazywać zatem różnitą strukturę przestrzenną. W związku z tym (6) w żywych organizmach związki węgla, na przykład glukoza, są w wysokim stopniu zredukowane – obfitują zatem w energię.

Z dominujących w litosferze pierwiastków jedynie krzem ma zdolność do wytwarzania trwałych cząstek o daleko różniących się wymiarach i kształtach, a także o dużej różnorodności grup funkcyjnych. Jakkolwiek zawartość krzemu w litosferze jest znacznie większa niż węgla, to nie daje on trwałych wiązań Si-Si w obecności O₂. Prowadzi to do tworzenia się krzemianów i nierozpuszczalnych polimerów dwutlenku krzemu, takich jak na przykład kwarc. Natomiast związki organiczne utworzone z CHON oraz, w mniejszych ilościach, w połączeniach z P i S, występujące w żywej materii, wykazują nadzwyczajną różnorodność, a większość z nich jest ogromnie złożona. Nawet najprostsze komórki (np. bakteria *Escherichia coli*) zawierają około 5 tys. różnych związków organicznych (3 tys. białek, tysiąc różnych kwasów nukleinowych, cukry, lipidy i in.). Organizmy wyższe, o bardziej skomplikowanej budowie, również zawierają białka i kwasy nukleinowe, jednak o wiele bardziej różnorodne. Dla przykładu, organizm człowieka ma około 5 mln rozmaitych białek, przy czym żadna z cząsteczek białkowych *E. coli* nie jest identyczna z którymkolwiek białkiem występującym u człowieka, jakkolwiek niektóre z nich pełnią podobne funkcje. W istocie każdy gatunek ma swój własny, chemicznie odrębny zestaw cząstek białkowych i kwasów nukleinowych.

Przy założeniu, że na Ziemi żyje około 2 000 000 gatunków, można obliczyć, iż łączna liczba różnego rodzaju cząsteczek białkowych we wszystkich żywych organizmach wynosi około 10¹², a różnych kwasów nukleinowych – około 10¹⁰. Jednakże zróżnicowania te, choć mogą zaskakiwać, kryją w sobie pewien paradoks. Polega on na tym, że to nieprawdopodobne bogactwo cząsteczek organicznych daje się ostatecznie sprowadzić do zadziwiającej prostoty (tab. 4). Białka (grec. *proteios*) to łańcuchy uszeregowane z wielu

Tabela 4. Udział cząsteczek budulcowych w składnikach organizmów żywych (wg Schopfa 2002)

Główne składniki cząsteczek budulcowych						Składniki organizmów żywych	Liczba cząsteczek budulcowych
Węgiel	Wodór	Tlen	Azot	Fosfor	Siarka		
	H	O				Woda	1
C	H	O	N		S	Białka	20 aminokwasów
C	H	O				Tłuszcze	pochodne 1 kwasu (palmitynowego)
C	H	O				Węglowodany	$C_m(H_2O)_n$ 1 wyjściowy (glukoza)
C	H	O	N	P		DNA, RNA, ATP	8 nukleotydów

różnych sekwencji tylko 20 aminokwasów. Podobnie kwasy nukleinowe, które tworzy zaledwie osiem rodzajów jednostek strukturalnych, zwanych mononukleotydami. Ponadto, te same aminokwasy i nukleotydy występują jako składniki budulcowe białek i kwasów nukleinowych u wszystkich żywych gatunków. Powinno się zatem uwzględnić hipotezę, według której te biomolekuły stanowią wytwór selekcji ewolucyjnej, czyli są to cząsteczki prawdopodobnie najlepiej przystosowane do pełnienia określonych funkcji biologicznych.

Występujące nielicznie proste cząsteczki budulcowe, komponenty makromolekuł, odznaczają się jeszcze inną niezwykłą cechą. Każda z tych cząsteczek pełni bowiem w żywych komórkach więcej niż jedną funkcję. Aminokwasy przeto są nie tylko jednostkami strukturalnymi cząsteczek białkowych, lecz także prekursorami: hormonów, alkaloidów, porfiryn, barwników, na przykład hemoproteiny, chlorofilu i wielu innych biomolekuł. Natomiast mononukleotydy pełnią dodatkowo rolę koenzymów i przenośników energii.

Już na podstawie tych kilku przykładów można dostrzec pewne aksjomaty molekularnej logiki życia. Widzimy więc, że u podstawy cząsteczkowej organizacji komórki istnieje prostota. Występowanie biomolekuł w tej samej postaci u wszystkich znanych gatunków sugeruje, że żywe organizmy mają wspólne pochodzenie. Widzimy dalej, że cechy każdego gatunku zostają utrzymane dzięki odrębnemu zestawowi kwasów nukleinowych i białek. W odróżnieniu od materii nieożywionej cząsteczki zawarte w żywych organizmach współdziałają z sobą i współoddziałują. Jednocześnie podlega-

ją one zespołowi reguł, dzięki którym mają zdolność do samoorganizacji i autoreplikacji. W końcu, w funkcjonalnej aktywności biomolekuł budulcowych dostrzegamy istnienie podstawowej zasady ekonomii molekularnej. Zamiast tworzyć nową grupę biomolekuł w celu uzyskania nowych jakości, wykorzystywane są te, które wyselekcjonowane zostały u zarania życia. Wydaje się, że są to najprostsze z możliwych cząsteczek, zachowane w optymalnej liczbie, pozwalające żyć i wykazywać cechy gatunkowe w warunkach środowiska, które je otacza. I chociaż niektóre z nich nie wykazują chemicznego powinowactwa, za sprawą metabolicznych przemian enzymatycznych mogą być od siebie zależne. Na przykład cukier (glukoza), kwas tłuszczowy (kwas palmitynowy) i aminokwas (alanina) choć są różnymi cząsteczkami, to komórka może wykorzystać wszystkie atomy węgla glukozy do wytworzenia z nich szkieletu alaniny, a cztery z sześciu atomów węgla z glukozy może wbudować do kwasu palmitynowego. Biomolekuły mogą zatem ulegać wzajemnym przekształceniom enzymatycznym. Tak więc nie liczba i rodzaj składników, a sposób ich łączenia zdecydował o tym, że właściwości cząsteczek mogły być dowolnie zmieniane.

W odróżnieniu od biomolekuł żywe komórki ujawniają jeszcze inny rodzaj ekonomii. Szczególnie wyraźnie uwidacznia się on w gospodarowaniu energią i materią. Wydajność komórek w przekształcaniu pobranej energii w pracę przewyższa znacznie sprawność większości maszyn skonstruowanych przez człowieka. Pochłaniana ze środowiska energia zostaje w komórkach odzyskana w formie energii chemicznej, a ta z kolei ulega przetworzeniu na pracę, np.: chemiczną – w biosyntezie składników komórkowych, mechaniczną – przy skurczu i ruchu, osmotyczną – podczas transportu materiałów do komórki. Zatem, w molekularnej logice życia należałoby jeszcze uwzględnić fakt, że komórka tworzy układ wydobywający ze środowiska energię.

W zależności od typu energii czerpanej ze środowiska komórki można podzielić na dwie duże grupy: fotosyntetyzujące, wykorzystujące światło słoneczne, i heterotroficzne, czerpiące energię z utleniania wysoce zredukowanych cząsteczek organicznych, na przykład glukozy. W obydwu procesach część energii swobodnej jest przekształcana w chemiczną, magazynowaną i przenoszoną przez ATP (adenozynotrójfosforan). Eksploatacja tej energii w komórkach zachodzi dzięki enzymom, czyli katalizatorom o wysokiej wydajności i zdolności zwiększania szybkości reakcji chemicznych, a przez to pozwalających na syntezę większej ilości makromolekuł. A enzymy? To również produkty prostych aminokwasów, a więc białka o wysokim stopniu wyspecjalizowania. Spośród 1000 znanych enzymów każdy może katalizować tylko jeden ściśle określony rodzaj reakcji chemicznej, nie za-

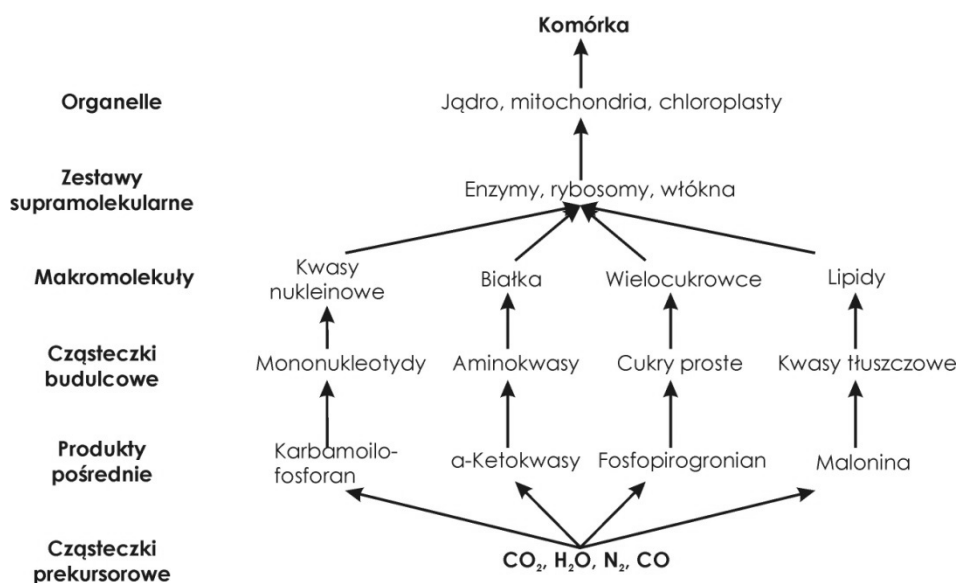
klócając innych. Warto zauważyć, że reakcje katalizowane przez enzymy przebiegają w ciągu zaledwie tysięcznych części sekundy, bez żadnych produktów ubocznych, dzięki czemu możliwe staje się jednoczesne przeprowadzanie wielu różnych procesów. Pojedynczy enzym przyspiesza tylko jedną z przemian danej cząsteczki i nie wpływa na inne. W każdej komórce, czyli w tym samym „pojemniku” mogą być zatem przeprowadzane równocześnie tysiące syntez. Wobec tego zachodzą one w warunkach przekraczających możliwości współczesnego i zaawansowanego technicznie laboratorium chemicznego. Ten wysoki stopień specyfiki enzymów wynika z zasady komplementarności strukturalnej. Zgodnie z nią cząsteczki „enzym-substrat” tworzą doskonały układ dopełniający się: podczas cyklu katalitycznego łączą się tylko ze „swoim” substratem. Fakt ten można uznać za fundamentalny aksjomat molekularnej logiki życia. Podobnie jak to, że jeśli w środowisku jakiś produkt jest dostępny w „gotowym stanie”, to komórka może „wylączyć” syntezę enzymu potrzebnego do wytworzenia z prekursorów danego produktu.

Spośród wszystkich zasad molekularnej logiki życia najbardziej intryguje jednak zdolność żywych komórek do odtwarzania się z niemal doskonałą wiernością i to przez setki oraz tysiące pokoleń. Znamienne przy tym jest to, że biorąc pod uwagę nawet najbardziej złożone żywe organizmy, przekazywana informacja genetyczna wydaje się być niewspółmiernie mała w stosunku do wielkości komórek pełniących funkcję przekazywania. Wszystkie informacje skupiają się w sekwencji nukleotydowej kwasu dezoksyrybonukleinowego (jego ilość = 6×10^{-12} grama) w jądrze komórkowym, a odcinki, w których zakodowane są informacje genetyczne, mają wymiary ułamków pojedynczej cząsteczki DNA. Przy tym podziw budzi trwałość informacji genetycznej. Mimo że nieprzechowywana na zwojach miedzi, w kamieniu, czy, z całym szacunkiem dla współczesności, na nośnikach cyfrowych wątpliwej trwałości, przetrwała ona co najmniej 3,5 mld lat. Dla porównania, najstarsze pismo klinowe z Mezopotamii ma niewiele ponad 5 tys. lat, co w naszej hipotetycznej skali czasu osiąga około 30 sek.

Poprzez translację cech struktury DNA na cechy struktury białek ujawnia się jeszcze jedna właściwość informacji genetycznej. Jako liniowa sekwencja jednostek mononukleotydowych odtwarza ona przestrzenną budowę komórek i ich części. Mamy tu zatem przejście od liniowo zakodowanej informacji genetycznej do skomplikowanych makromolekularnych i supramolekularnych składników żywych organizmów, z zachowaniem dokładnej odtwarzalności zestawów białek. Zgodnie z zasadą komplementarności strukturalnej zawarte w zestawach białek cząsteczki pasują do siebie tylko w jeden określony sposób.

Hierarchia struktury komórki

Biomolekuły w żywych organizmach wykazują stan uporządkowania i tworzą układ o wzrastającej złożoności molekularnej. Wszystkie one wywodzą się od bardzo prostych i niskocząsteczkowych prekursorów: CO_2 , H_2O , N_2 (ryc. 6). W żywej materii prekursorzy ulegają przekształceniu, tworząc cząsteczki pośrednie o wzrastających wymiarach molekularnych, a następnie cząsteczki budulcowe, dalej związki organiczne o średniej masie cząsteczkowej. Cząsteczki te z kolei łączą się kowalencyjnie, dając makromolekuły o stosunkowo wysokiej masie cząsteczkowej. W ten sposób aminokwasy stają się jednostkami strukturalnymi białek, mononukleotydy – kwasów nukleinowych, cukry proste – wielocukrów, a kwasy tłuszczowe – tłuszczów. Na następnym, wyższym poziomie organizacji makromolekuły różnych klas łączą się między sobą w kompleksy, czyli zestawy supramolekularne, na przykład rybosomy, inaczej: zespoły kwasów rybonukleinowych (RNA) i białek powiązane słabymi wiązaniami niekowalencyjnymi: wodorowymi, jonowymi, oddziaływaniami hydrofobowymi. Na najwyższym poziomie organizacji, w hierarchii struktury komórkowej, supramolekularne kompleksy tworzą organelle: jądro, mitochondria, chloroplasty, lizosomy, wakuole, także „sklejone” wiązaniami niekowalencyjnymi.



Ryc. 6. Hierarchia w żywej komórce (Lehninger 1979)

Każda żywa komórka wszystkich znanych gatunków składa się z czterech głównych klas biomakromolekuł. Ich udział w masie komórki, na przykład u wspomnianej ulubionej bakterii genetyków molekularnych – *Escherichia coli* jest następujący: białka – 15%, DNA – 1%, RNA – 6%, cukrowce – 3%, lipidy – 2% oraz woda – 70% i inne cząsteczki budulcowe – 3%. Każdy z czterech rodzajów biomakromolekuł pełni identyczną funkcję. I tak, zasadniczo kwasy nukleinowe odpowiadają za przechowywanie i przekazywanie informacji genetycznej. Produktem działania genów są białka. Te z kolei w większości przejawiają swoistą aktywność katalityczną, a ponieważ są najbardziej czynne ze wszystkich biomolekuł, odpowiadają za jeszcze wiele innych funkcji biologicznych (co szczegółowiej opisuję w podrzdz. *Oligo- i polipeptydy*). Istotne znaczenie wielocukrów wynika właśnie z faktu, że niektóre z nich, na przykład skrobia, są wykorzystywane jako zapasowe formy „paliwa” niezbędnego do uzyskania energii, inne natomiast, na przykład celuloza, stanowią pozakomórkowe elementy strukturalne. Podobnie tłuszczoce. Z jednej strony tworzą, jako główne składniki strukturalne, błonę, z drugiej zaś występują jako zapasowa forma paliwa bogatego w energię. Jeszcze raz potwierdzona została tu prostota i ekonomia składające się na molekularną logikę życia.

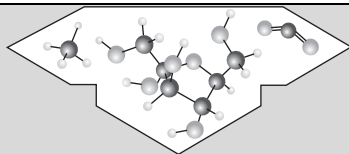
Jakkolwiek żywa materia zawiera niezliczoną liczbę różnych białek i kwasów nukleinowych, które są zbudowane z bardzo niewielu cząsteczek budulcowych, takich samych u wszystkich gatunków, to jednak najnowsze badania nad składem chemicznym najprostszych komórek *Mycoplasma* pozwalają przypuszczać, że pierwsze komórki mogły być zbudowane zaledwie z 30 różnych cząsteczek organicznych. Ten zestaw biomolekuł pierwotnych obejmuje: 20 aminokwasów, 5 aromatycznych zasad azotowych, 1 kwas tłuszczowy, 2 cukry proste, 1 alkohol – glicerol i 1 aminę – cholinę. W rzeczywistości wykaz ten można skrócić nawet do 25 rodzajów cząstek, gdyż z badań nad kodem genetycznym wynika, że pierwsze żywe komórki wymagały tylko 16 aminokwasów z obecnie występujących w białkach. Słusznie zatem biomolekuły pierwotne można zaliczyć do protoplastów wszystkich innych biomolekuł.

Ich zróżnicowanie i wyspecjalizowanie postępowało z ewolucją organizmów żywych. Przebiegało to zawsze zgodnie z zasadą maksymalnej wydajności. Z minimum, jakie stanowi baza 30 (25) biomolekuł pierwotnych, do dziś wytworzyła się duża liczba ich pochodnych. I tak, znamy już ponad 300 rodzajów aminokwasów pochodzących od 20 (16) podstawowych biomolekuł oraz wiele wyspecjalizowanych makrocząsteczek, na pozór niepodobnych do żadnego z 30 (25) pierwowzorów, np.: barwniki, olejki eteryczne, hormony, woski, toksyny, lignina itp. Ostatecznie można je wyprowadzić z pierwotnych biomolekuł lub produktów ich rozpadu. Owa zasada

wydajności dotyczy też dziesiątków nukleotydów i ich pochodnych wywodzących się z zaledwie 5 zasad azotowych występujących w kwasach nukleinowych oraz z ponad 70 cukrów prostych, z wielką różnorodnością wielocukrów pochodzących od glukozy, a także z dużej liczby kwasów tłuszczowych, którym dał początek kwas palmitynowy.

Wobec powyższego, trudno nie zapytać, jak to się stało, że akurat 20, a nie 10 czy 50 aminokwasów stanowi cząsteczki budulcowe białek? Dlaczego na przykład z dziesiątków znanych pochodnych puryn i pirymidyn tylko dwie pary: adenina i guanina oraz cytozyna i tymina to podstawowe cząsteczki budulcowe DNA wszystkich gatunków? Wydaje się, że owe podstawowe biomolekuły stanowią wytwór selekcji ewolucyjnej – „zostały wybrane” ze znacznie większej liczby związków organicznych dostępnych w pierwotnym oceanie. Prawdopodobnie charakteryzują się one najlepszym przystosowaniem do pełnienia określonych funkcji biologicznych oraz współdziałają z sobą w układzie bardzo specyficznych powiązań i zależności. Można domniemywać, że to właśnie dzięki nim przeżywalność zawierających je komórek była wyższa niż innych. Należy przy tym pamiętać, że każda biomolekuła pełni więcej niż jedną funkcję, a zatem możemy wnioskować, że przejawia właściwości optymalne dla jej wszystkich funkcji biologicznych rozpatrywanych łącznie.

Właściwości molekuł, z jednej strony poddane zasadzie prostoty, z drugiej specyficznej wydajności, stanowią jedynie zapowiedź tego, jak zaskakujące mogą być etapy początku życia na naszej planecie.



MARTWE POCZĄTKI ORGANIZMÓW ŻYWYCH

W zakładanym procesie powstawania i rozwoju życia na Ziemi wyróżnić można trzy fazy. Pierwsza z nich to ewolucja biochemiczna, w czasie której abiotycznie powstawały proste związki organiczne (aminokwasy, nukleotydy, cukry, kwasy organiczne i in.). Druga dotyczy procesów polimeryzacji biologicznej, tworzenia cząsteczek o dużej masie, jak: kwasy nukleinowe, białka, wielocukry, lipidy, które same organizowały się w cykle i protokomórki. Trzecia, najbardziej złożona, określana jest jako ewolucja biologiczna. Celowo pominięty tu został etap ewolucji chemicznej prowadzący do tworzenia się materii w ogóle, gdyż dotyczy on innej, bardzo odległej w czasie i przestrzeni, wczesnej historii wszechświata. Wtedy powstawały główne ilości wodoru i helu oraz gwiazdy, w tym nasze Słońce, z którego pochodzą pozostałe znane na Ziemi pierwiastki.

Potęga biomolekuł

Ich początki to w istocie etap ewolucji biochemicznej. Jej idea wyrasta z jednej prostej przesłanki filozoficznej, dwóch przypuszczeń i trzech dowodów empirycznych. Mowa tu zatem o „sześciu warunkach”. Pierwszy dotyczy ekstrapolacji darwinowskiej koncepcji ewolucji na świat nieożywiony. Drugi to założenie, że pierwotne środowiska Ziemi miały redukcyjny charakter. Zgodnie z trzecim, o charakterze hipotetycznym, pierwsze organizmy były heterotrofami. Czwarty wskazuje na dane biologiczne, według których wszystkie organizmy żywe zbudowane są z tych samych, stosunkowo nielicznych cząsteczek. Piąty polega na eksperymentalnym wykaza-

niu, że związki organiczne można otrzymać z prostych prekursorów nieorganicznych, w warunkach imitujących domniemaną pierwotną atmosferę i hydrosferę. Ostatni, szósty warunek mówi o paleobiochemicznych (biomarkery) i paleontologicznych (skamieniałości) świadectwach na rzecz ewolucji biochemicznej, a następnie biologicznej.

O ile trudno jest potwierdzić pierwszy warunek z racji jego filozoficznej natury, wsparcia dla dwóch kolejnych dostarczają przedstawione geologiczne badania skorupy ziemskiej oraz atmosfery i hydrosfery. Za warunkiem czwartym, czyli wspólnego pochodzenia wszystkich organizmów od jednego przodka, zdecydowanie przemawia kilka faktów. Najpierw budowa komórkowa, a więc jedność w strukturze. Następnie powiązania biochemiczne. Wszystkie organizmy potrafią bowiem wytwarzać: glukozę, przeprowadzać proces glikolizy, produkować składnik błon komórkowych, tworzyć DNA, złożone zawsze z nukleotydów: A, T, G, C, RNA zbudowane z: A, U, G, C, białka o różnych kombinacjach tego samego zestawu 20 aminokwasów. Wreszcie więź genetyczna, typowa dla wszystkich organizmów żywych, które mają transkrypcję, translację, taki sam kod genetyczny, to jest współzależność między sekwencją zasad w DNA a sekwencją aminokwasów w białku. Dwa ostatnie warunki są coraz częściej potwierdzane licznymi modelowymi eksperymentami, wspierającymi coraz kompletniejsze teorie biogenezy, a także przez skamieniałości.

Synteza cząsteczek budulcowych

Podstawę dla nowoczesnych prac eksperymentalnych nad chemicznym pochodzeniem życia stanowi hipoteza Oparina (1924). W ciągu sześćdziesięciu lat po obaleniu przez Pasteura spontanicznego powstawania „zarazków”, dokonał się wielki postęp w dziedzinach: chemii organicznej, biochemii, geologii, astrofizyki i biologii komórki. W rezultacie rosyjski botanik Aleksander I. Oparin zaproponował nową koncepcję spontanicznego zaistnienia życia na Ziemi. Zamiast nagłego pojawienia się w pełni ukształtowanych organizmów (samoródtwo) zasugerował, że pierwsze żywe komórki powstały podczas długiego, wieloetapowego procesu przedbiologicznej ewolucji, zwanej tu biochemiczną. Rozpoczęła się ona z zaistnieniem drugiej atmosfery Ziemi.

W swojej „teorii” Oparin zakładał, że ogromne ilości energii, pochodzące z: promieniowania ultrafioletowego, jonizującego, działalności wulkanów, energii elektrycznej błyskawic, ciepła i promieniotwórczości, wywoływały w gazach obecnych w atmosferze reakcje chemiczne, których produkty, złożone substancje organiczne zbudowane z prostych związków takich, jak

metan i amoniak, reagowały z sobą, tworząc coraz bardziej skomplikowane cząsteczki: aminokwasy, cukry, puryny i pirymidyny. Te substancje, czyli biomonomery, prawdopodobnie kumulowały się w pierwotnych oceanach, formując „organiczną zupę”.

Realne przesłanki do takiego wyjaśnienia początków życia pojawiły się w pierwszej połowie XIX w., kiedy Wöhler, w latach 1824–1828, dokonał syntezy mocznika z substancji nieorganicznych. Dowiódł tym, że w warunkach laboratoryjnych można przemienić związki nieorganiczne w organiczne. Wykazał więc, że prawdopodobne jest wyjaśnienie wyjątkowych własności żywej materii na gruncie makrocząsteczek, które składają się z tych samych atomów i molekuł co materia nieożywiona. Następny krok uczynił Darwin, wypowiadając się w roku 1871 na temat hipotezy „naturalnych początków” życia.

Obecnie wiadomo już, że biomolekuły pierwotne, czyli proste związki organiczne wchodzące w skład organizmów żywych, rzeczywiście powstają z abiotycznych prekursorów jedynie w wyniku działania procesów fizycznych, również abiotycznej natury. Chodzi tu zatem o reakcję między sugerowanymi składnikami pierwotnej atmosfery i praooceanu, wywołaną wpływem energii promienistej Słońca i promieni kosmicznych lub wyładowań atmosferycznych. Ponad wszelką wątpliwość wykazano to w licznych badaniach i eksperymentach laboratoryjnych (tab. 5), wykonanych w ostatnich dziesięcioleciach. Najnowsze z nich, z takich dziedzin, jak: paleoceanografia, astrobiologia, paleontologia i geologia archaiku, pozwalają nadto sądzić, iż warunki panujące we wczesnych okresach historii Ziemi sprzyjały nie tylko istnieniu w oceanach wielu różnych związków organicznych, ale że związki te występowały w stosunkowo dużym stężeniu. Liczne eksperymenty wykorzystujące przypuszczenia Oparina (1924) czy Haldane’a (1929)³⁷, jak również efekty pracy Stanleya Millera z 1953 r. przeszły już do klasyki paleochemii. Starając się w nich odtworzyć pierwotne warunki panujące na Ziemi, stosując zarówno nieorganiczne prekursory występujące prawdopodobnie wówczas w środowisku, jak również różnego rodzaju energię promienistą, uzyskiwano syntezę cząstek organicznych – aminokwasy i cukry.

Przed 1953 r. problem warunków początkowych biogenezy traktowano jedynie teoretycznie. Pod uwagę brano zawsze mieszanie gazów redukujących, zasobnych w amoniak, wodór i metan. Zgodnie z sugestią Darwina

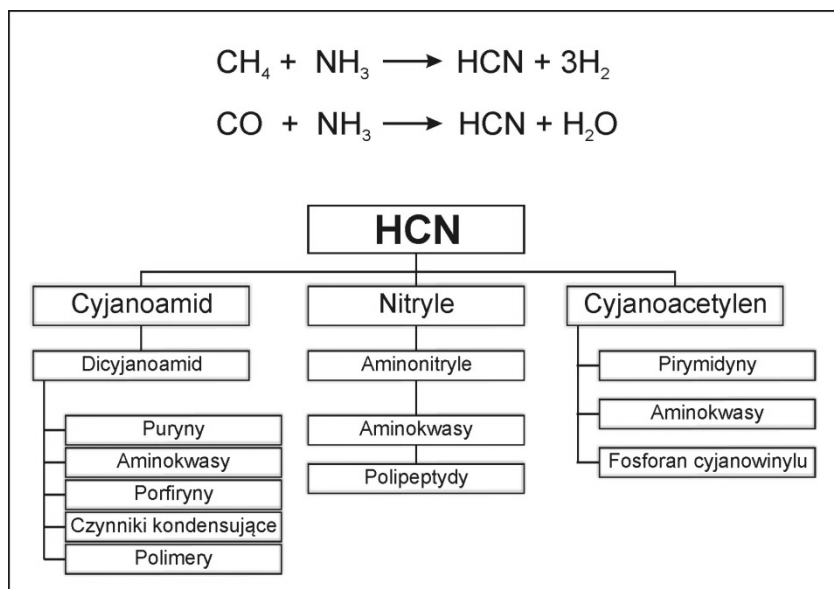
³⁷ Koncepcje Oparina i Haldane’a choć powstały od siebie niezależnie, to mimo pewnych różnic wychodzą od tej samej idei. Zgodnie z nią, ukształtowanie się pierwszych form żywych musiało odbywać się w toku długotrwałej ewolucji związków chemicznych, przyjmujących następnie coraz wyższy poziom organizacji, aż do powstania najprostszego układu żywego (vs. nagle powstanie wysoko zorganizowanych form w wyniku samoródtwa). Przez niektórych idea ta zwana jest hipotezą Oparina–Haldane’a.

Tabela 5. Zestawienie współczesnych koncepcji biogenezy (wg Ługowskiego 1990, patrz Sobczyńska 2001)

About 1988	Elitzur 1994	Nisbet 1986
Allen 1957, 1988	Erhan 1977	Novak 1982
Anderson i Stein 1983	Eyring i Johnson 1957	Nusinow i in. 1986
Bagley i Farmer 1992	Ferracin 1981	Olson 1981
Bogacki 1990	Florowska 1964	Oparin 1977
Bahadur 1981	Folsome 1979	Oró 1986
Balasubramanian 1982	Fong 1973	Pace i Marsch 1985
Barbieri 1985	Fox R.F. 1982	Pattee 1973
Bernal 1967	Fox S.W. 1973, 1980	Peliti 1989
Bhargava i Gambhir 1984	Gánti 1979	Portelli 1979
Black 1973	Garzón 1993	Quastler 1964
Blum 1962	Haldane 1964	Rasmussen 1989
Bounias 1990	Hart 1967	Ratner 1985
Brack 1990	Hoyle 1979	Rosen 1984, 1991
Bresch 1980	Jasaitis 1982	Rössler 1971
Buvet 1974	Joyce 1989	Rudenko 1969, 1986
Caims–Smith 1982	Joyce i Orgel 1986	Russell i in. 1994
Calvin 1969	Kacenberg 1990	Rutten 1971
Cendrangolo 1964	Kacser i Beeby 1984	Schopf i in. 1983
Clark 1988, 1993	Kaplan 1978	Schramm 1975
Conrad 1982	Kauffman 1993	Schwartz 1983
Corliss i in. 1981	Kenyon 1969	Schwemmler 1991
Coyne 1985	King G.A.M. 1977	Scorei 1988
Crick i Orgel 1973, 1982	King K. 1979	Scott 1979
Csányi i Kampis 1985	Kompaniczenko 1993	Segal i in. 1983
Czemawski i Czernawska 1984	Krueger 1989	Shapiro 1986
Danchin 1990	Kuhn 1972, 1984	Shimizu 1984
Darnell i Doolittle 1986	Lahav 1985	Simionescu i Dénes 1983
Dauvillier 1958, 1965	Lazcano 1986	Szathmáry i Demeter 1987
Decker 1978	Macovschi 1978	Sznol 1979
Demetrius 1983	Marchinin 1985	Trincher 1967
Dillon 1978	Matsuno 1989	Tsallis i Ferreira 1986
Dose 1984	Mekler 1980	Wächtershäuser 1989
Doskocil 1987	Morowitz 1993	Wald 1974
Dounce 1981	Morozow i in. 1986	Wassermann 1982
de Duve 1991	Mosqueira 1986	Weber 1987
Dyson 1985	Muchin 1984	Weiner 1987
Ebeling i Feistel 1982	Muller A.J.W. 1993	White 1980
Egami 1978	Muller H.J. 1961	Woese 1980
Eigen i Schuster 1973, 1978	Nikołajew 1982	Wojtkiewicz 1988

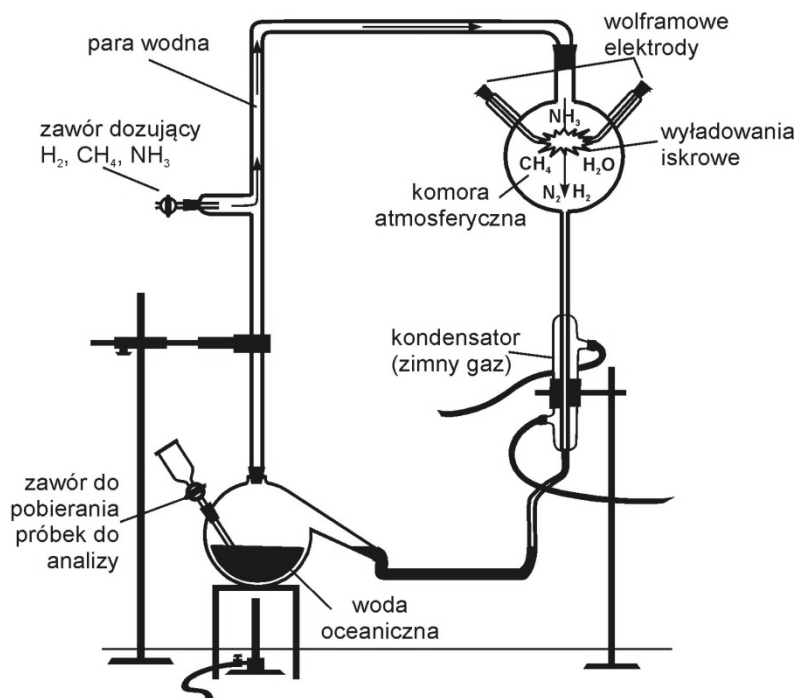
i hipotezą Oparina–Haldane’a energia promienista Słońca lub wyładowania atmosferyczne stanowią czynniki aktywujące gazy. Jednakże, jak później wykazano, aminokwasy, cukry, puryny i pirymidyny mogą również powstawać przy napromienianiu mieszanin o bardziej utleniającym charakterze, w których głównymi składnikami są: tlenek i dwutlenek węgla, azot, wodór. Natomiast w doświadczeniach tych metan i amoniak nie występowały w większych ilościach. Z czasem badania koncentrowały się na jeszcze mniej zróżnicowanych związkach. W większości ciągów reakcji prowadzących do utworzenia prostych związków organicznych centralną rolę odgrywa cyjanowodór (HCN), który łatwo powstaje w następujących reakcjach: $\text{CH}_4 + \text{NH}_3 \rightarrow \text{HCN} + 3\text{H}_2$; $\text{CO} + \text{NH}_3 \rightarrow \text{HCN} + \text{H}_2\text{O}$ (ryc. 7). W eksperymentach laboratoryjnych wykazywano ponadto, że w warunkach beztlenowych i wysokoenergetycznych mogą powstać różne kategorie związków organicznych z pojedynczych, czynnych substancji pośrednich, jakimi są HCN czy formaldehyd (H_2CO).

HCN z łatwością reaguje z nienasyconymi węglowodorami, na przykład z etylenem, dając nitryle będące prekursorami aminokwasów. Później udowodniono, że związek ten jest również ważnym prekursorem pirymidyn i puryn, jak również czynników zdolnych do przeprowadzania różnych reakcji kondensacji z odwodnieniem, takich jak wytwarzanie peptydów z aminokwasów albo polifosforanów z ortofosforanów.



Ryc. 7. HCN – prekursor cząsteczek budulcowych (wg Lehningera 1979)

Najprawdopodobniej pierwszy eksperyment, podczas którego usiłowano odtworzyć warunki powstania życia, a przynajmniej organicznych związków chemicznych, wchodzących w skład żywych organizmów, przeprowadził Stanley Miller w roku 1953. Pracując wówczas w laboratorium Harolda C. Ureya, badacz ten wykazał, iż w warunkach proponowanych przez Oparina i Haldane'a rzeczywiście powstają cząsteczki organiczne. Czynnikiem mającym istotny wpływ na powodzenie reakcji prowadzących do powstania „chemicznych cegiełek życia” było dostarczanie energii. Zgodnie z ówczesną wiedzą Miller stosował przede wszystkim wyładowania iskrowe i ciepło jako źródła energii aktywujących składniki pierwotnej atmosfery. Używał do tego prostej aparatury (ryc. 8). Składała się ona zasadniczo z dwóch kolb połączonych rurkami. W górnej, „atmosferycznej” kolbie gazowe mieszaniny: metanu, amoniaku, wody i wodoru w 80°C zostały poddane symulowanym wyładowaniom atmosferycznym z zastosowaniem łuku elektrycznego z prądu o napięciu 60 000 V. Produkty tych reakcji przechodziły przez skraplacz i rozpuszczały się w drugiej, dolnej kolbie imitującej „ocean”, którego podgrzewanie wymuszało obieg pary wodnej w całej aparaturze. Po tygodniu Miller stwierdził, że w fazie gazo-



Ryc. 8. Schemat aparatury Millera do laboratoryjnej syntezy związków organicznych

wej pojawiły się tlenek i dwutlenek węgla oraz azot, a w kondensacie znalazł rozpuszczone w wodzie substancje organiczne. Następnie metodami chromatografii zidentyfikował: aminokwasy, w tym występujące w białkach (glicynę, alaninę, kwas asparaginowy, kwas glutaminowy), kwas mrówkowy, octowy, propionowy, mlekowy i bursztynowy. Zdaniem Millera, w kolbach zaszło szereg reakcji, z których mogło dojść do wytworzenia się aminokwasów, np.:

- 1) $\text{CH}_4 + \text{NH}_3 \rightarrow \text{HCN} + 3\text{H}_2$,
- 2) $\text{C}_2\text{H}_4 + \text{HCN} \rightarrow \text{CH}_3\text{CH}_2\text{CN}$ (nityl),
- 3) $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CN} \xrightarrow{\text{obecności wody}} \text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$ (kwas propionowy),
- 4) $\text{CH}_3\text{CHOHCN} \rightarrow \text{CH}_3\text{CHNH}_2\text{CN}$ (aminonityl),
- 5) $\text{CH}_3\text{CHNH}_2\text{CN} \rightarrow \text{CH}_3\text{CHNH}_2\text{COOH}$ (alanina).

W pierwszej z nich, z metanu i amoniaku pod wpływem wyładowań elektrycznych, powstał HCN, a metan przekształcił się ponadto w etylen (C_2H_4) i inne węglowodory. W drugiej cyjanowodor reagując z etylenem, dał nityl, który uległ hydrolizie do kwasu propionowego. Z kolei hydroksynityle (reakcja 4) reagując z amoniakiem, tworzyły aminonityle, które w wyniku hydrolizy przekształciły się w aminokwasy, na przykład alaninę. Natomiast glicyna, zdaniem Millera, była wynikiem reakcji między dwoma wcześniej powstałymi prostymi związkami – formaldehydem i cyjanowodorem.

Kilka lat po przeprowadzeniu tego eksperymentu, w 1961 r., w Murchison w Australii spadł meteoryt. Z analizy chemicznej wynikało, że zawierał on pewną liczbę takich samych aminokwasów i w podobnych stosunkach ilościowych, jakie powstały w doświadczeniu Millera (tab. 6). Ta zbieżność uwiarygodniła jego eksperyment. Stworzone w laboratorium warunki mogły rzeczywiście naśladować środowisko istniejące na prebiotycznej Ziemi, które, jak się okazało, nie było na niej czymś wyjątkowym.

Miller i Urey przeprowadzili swoje doświadczenie w układzie bogatym w związki zredukowane. W nowszych eksperymentach stosowano mieszaniny zawierające: N_2 , H_2O , CO , CO_2 , lecz pozbawione metanu i amoniaku. Mimo to, pod działaniem energii wyładowań elektrycznych, w mieszaninach tych – znowu poprzez HCN – powstały aminokwasy i inne cząsteczki organiczne. Dowodzi to, że abiotyczne powstanie tych cząsteczek nie wymaga uprzedniego utworzenia amoniaku i metanu. Wspomniane mieszaniny gazów, w później wykonywanych doświadczeniach, napromieniowywano światłem widzialnym lub nadfioletowym, promieniami X lub γ , poddawano też iskrowym wyładowaniom elektrycznym, działaniu fal ultradźwiękowych, jak również cząsteczek o dużej energii, to jest α i β . W rezultacie za każdym razem otrzymywano kilkaset różnych związków organicznych występujących także w komórkach. W ten sposób zsyntetyzowano wszystkie aminokwasy powszechnie obecne w białkach, zasady azotowe (A – adeninę,

Tabela 6. Zawartość związków organicznych w meteorycie Murchisona i w produktach otrzymanych przez Millera w jego doświadczeniu

Aminokwasy	Meteoryt Murchisona	Eksperyment Millera
Glicyna	●●●●	●●●●
Alanina	●●●●	●●●●
Kwas α-amino- <i>N</i> -masłowy	●●●	●●●●
Kwas α-aminizomasłowy	●●●●	●●
Walina	●●●	●●
Norwalina	●●●	●●●
Izowalina	●●	●●
Prolina	●●●	●
Kwas pipekolowy	●	●
Kwas asparaginowy	●●●	●●●
Kwas glutaminowy	●●●	●●
β-alanina	●●	●●
Kwas β-amino- <i>N</i> -masłowy	●	●
Kwas β-aminizomasłowy	●	●
Kwas γ-aminomasłowy	●	●●
<i>N</i> -etyloglicyna	●●	●●●
<i>N</i> -metyloalanina	●●	●●

Kolorem szarym zaznaczono aminokwasy występujące w meteorycie i powstałe w doświadczeniu Millera; za pomocą ● przedstawiono stosunki ilościowe (źródło: „Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology” 1987, Vol. LII, by Cold Spring Harbor Laboratory)

G – guaninę, C – cytozynę, T – tyminę, U – uracyl), wykorzystywane do budowy kwasów nukleinowych, oraz wiele kwasów organicznych i cukry.

W 1961 r. Juan Oró sprawdzał, czy można uzyskać aminokwasy, stosując jeszcze prostsze składniki wyjściowe niż w doświadczeniach Millera–Ureya. W roztworze wodnym zmieszał HCN i amoniak. W rezultacie potwierdził, że aminokwasy rzeczywiście tworzą się z tych substancji, a ponadto dokonał nieoczekiwanego odkrycia: w największym stężeniu występowała adenina, jedna z zasad azotowych DNA i RNA, która jest również składnikiem ATP. Dalsze badania dowiodły, że pozostałe zasady kwasów nukleinowych mogą powstawać w wyniku reakcji między HCN, cyjanogenem (C₂N₂) i cyjanoacetylenem (HC₃N).

W świetle tych wyników możemy domniemywać, że w pierwotnym oceanie istniały zasoby rozpuszczonych w nim związków organicznych. Co więcej, mógł on zawierać nawet wszystkie podstawowe cząsteczki budulcowe, których obecność stwierdzamy dzisiaj w żywych komórkach. I choć była to raczej „cienka zupa” – do tej pory geologia nie dostarczyła świadectw istnienia prymitywnego bulionu³⁸ – to pozostaje faktem, że z kilkuset abiotycznie otrzymanych związków organicznych tylko 30 (lub 25 biomolekuł pierwotnych) okazało się potrzebnych do utworzenia pierwszych komórek (o czym pisałem w podrozdz. *Hierarchia struktury komórki*).

Na gruncie tych eksperymentów powstało wiele scenariuszy biogenezy coraz lepiej ugruntowanych teoretycznie. Tylko w ciągu 37 lat (1957–1993), jakie upłynęły między pierwszą a dziesiątą konferencją międzynarodową na temat powstania życia, opublikowano ponad 120 względnie całościowych koncepcji (tab. 5). Projekty te, naśladujące biogenezę, zawierają przynajmniej jeden, ale istotny, słaby punkt. Zwracają na niego uwagę szczególnie zwolennicy pozaziemskiego pochodzenia życia. Otóż, owe eksperymenty nie dają odpowiedzi, dlaczego w wyniku syntezy laboratoryjnej stale produkowane były składniki racemiczne, czyli mieszanki cząsteczek budulcowych (ryc. 6), składające się w połowie z form lewoskrętnych i w połowie z prawoskrętnych, podczas gdy żywe organizmy nie składają się z ich mieszaniny. Aminokwasy, czyli „cegiełki” budujące białka, zawsze charakteryzuje lewoskrętność, prawoskrętne są natomiast cukry. Warto też zauważyć, że białka w organizmach żywych nie mogłyby w ogóle utworzyć się, gdyby znajdowały się w mieszaninie obu odmian aminokwasów. Jak twierdzą chemicy, aby powstało życie, które znamy obecnie, w białkach muszą występować aminokwasy jednego rodzaju. Ewentualne pomieszczenie dwóch symetrii całkowicie zmieniłoby właściwości protein. Powstałby przy tym chaos tak wielu różnych form tych związków, iż proces życia nie mógłby się nawet rozpocząć³⁹. Zagadka ta stała się więc kluczowym wyzwaniem dla badaczy, z których wielu uważa, iż dopóki nie nastąpi jej rozwiązanie, nikt nie może mówić, że odkryto naturalistyczne wyjaśnienie dla pochodzenia życia. Klasyczne teorie nie dają tu zadowalającej odpowiedzi...

³⁸ Krytycy twierdzą, i poniekąd mają rację, że procesy destrukcyjne (biomolekuły są termodynamicznie nietrwałe) w warunkach wodnych przeważały nad tymi prowadzącymi do powstawania coraz to bardziej skomplikowanych struktur molekularnych. Jeśli nawet taki „bulion” kiedykolwiek istniał – powiadają krytycy – to najwyżej przez krótki okres, niewystarczający, aby ewolucja biochemiczna mogła przejść przez wszystkie postulowane przez badaczy stadia.

³⁹ O groźbie, jaką z sobą niesie obecność choćby jednego prawoskrętnego aminokwasu w tysiącach lewoskrętnych odpowiedników, niech świadczy fakt, że potrafi on zniszczyć właściwości powstałego z nich białka. Chemicznie nie można oddzielić tych dwóch form od siebie, gdyż chemicznie właśnie są identyczne. Dopiero DNA może to uczynić.

Dlaczego zatem materia ożywiona „woli” lewoskrętne aminokwasy i prawoskrętne cukry od swoich lustrzanych odbić?

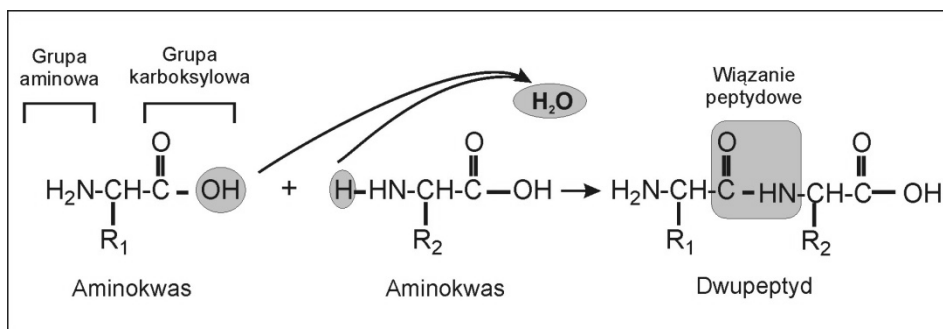
Naukowcy, usiłując rozwiązać ten problem, starali się stworzyć wiarygodne warunki naturalne, w których gromadzenie się lewoskrętnych aminokwasów przeważałoby nad ich prawoskrętnymi odpowiednikami. Niestety, ich wysiłki zakończyły się niepowodzeniem. Z pomocą przyszedł dopiero zespół Jeremy’ego Baileya z Anglo-Australian Observatory w Epping, w Australii (Bailey 2000). Na właściwy, ich zdaniem, trop trafili, obserwując Wielką Mgławicę Oriona, znajdującą się w odległości 1500 lat świetlnych od Ziemi. W naszym modelu Drogi Mlecznej znajdowałaby się ona około 10 300 km od nas (mniej więcej tak daleko jak jezioro Bajkał od Poznania). Punktem wyjścia stała się pewna prawidłowość. Z jednakowej liczby prawo- i lewoskrętnych cząsteczek znajdujących się w substancji poddanej kołowo spolaryzowanemu światłu większość przyjmie taki skręt, na jaki pozwoli im kierunek działania spolaryzowanego światła. Kołowa polaryzacja rzadko zachodzi w naturalnych warunkach. Wiele bowiem źródeł światła, w tym nasze Słońce, ale też większość żarówek, wysyła światło niespolaryzowane. W Wielkiej Mgławicy Oriona znajduje się natomiast obszar, w którym powstają nowe gwiazdy i istnieje wiele organicznych cząsteczek (badacze nazywają go Chmurą Cząsteczkową Oriona 1). Tam właśnie astronomowie dostrzegli niezwykle natężenie kołowo spolaryzowanego światła. Przypuszczają, że rejon Oriona odpowiada miejscu, w którym niegdyś narodził się nasz system planetarny. Oznaczać to mogłoby, że na Ziemię, około 4 mld lat temu, oddziaływała gwiazda neutronowa. Emitując ten typ promieniowania, w tym wypadku lewoskrętnego spolaryzowania, sprzyjała ona tworzeniu się lewoskrętnych aminokwasów.

Jak światło spolaryzowane wpłynie na powstałe w laboratorium aminokwasy, postanowili w roku 2005 sprawdzić między innymi Uwe Meierhenrich i Laurent Nahon, fizycy z ośrodka badawczego w Orsay pod Paryżem. Zastanawiali się, czy zniszczy ono jedną z ich form, pozwalając drugiej tworzyć pełnowartościowe białka. Po wielu godzinach naświetlania w mieszaninie składającej się początkowo z równych ilości obu form, prawo- i lewoskrętnej, ich proporcje rzeczywiście zostały zakłócone. Otrzymano więc dowód, że promieniowanie międzygwiazdne może zmieniać proporcje obu aminokwasów.

Jest zatem bardzo prawdopodobne, że organizmy zbudowane z prostych cegiełek jednego rodzaju dostosowały się do zmieniających się warunków. Możliwie też, że po powstaniu życia informacja o lewoskrętnej strukturze została na tyle silnie zakodowana, że przetrwała nawet ewentualną późniejszą zmianę polaryzacji światła, nie mogąc już zmienić symetrii zaadoptowanych biomolekuł.

Nieograniczone możliwości architektoniczne – polimeryzacja

Kolejnym etapem chemicznej ewolucji wyselekcjonowanych, pierwotnych cząsteczek budulcowych do układów biomolekularnych musiało być wytworzenie kowalencyjnych wiązań łączących te cząsteczki w łańcuchowe oligo- i polimery. W tym miejscu napotykamy jednak na pewien paradoks. Otóż, wiązania kowalencyjne pomiędzy cegiełkami budulcowymi w: białkach, kwasach nukleinowych, polisacharydach i lipidach są rezultatem usuwania składników cząsteczek wody z kolejno po sobie następujących jednostek monomerycznych. Jednakże wiązania peptydowe, glikozydowe i estrowe wykazują nietrwałość termodynamiczną w układach wodnych. Oznacza to, że dążą one do hydrolizy i w stanie równowagi, w rozcieńczonym układzie może istnieć tylko niewielka liczba takich wiązań. Aby więc pierwotne polipeptydy i polinukleotydy nagromadziły się w oceanie, musiałyby istnieć jakieś sposoby, za pomocą których powstałaby duża wydajność w reakcjach kondensacji odwadniającej pomiędzy dwiema cząsteczkami budulcowymi; tak jak w reakcji: aminokwas + aminokwas → dipeptyd + H₂O (ryc. 9). W obecnym świecie żywym znane są dwa sposoby. Pierwszy



Ryc. 9. Wytwarzanie wiązań peptydowych pomiędzy aminokwasami (wg Schopfa 2002)

polega na przeprowadzeniu reakcji w warunkach bezwodnych, na przykład w temperaturze zbliżonej do punktu wrzenia wody. Drugi, to zastosowanie chemicznych czynników kondensujących, czyli związków zdolnych do wiązania nie tyle wolnej wody, ile wybiórczego działania w stosunku do jej składników usuwanych z cząsteczek budulcowych (ryc. 9). Prawdopodobny jest scenariusz, że w pierwotnych warunkach na Ziemi występowały obydwa rodzaje tych procesów. Wysokie temperatury, często przekraczające

100°C, towarzyszą wpływom z kominów hydrotermalnych, a najprostszym czynnikiem kondensującym są jony H^+ . Niewykluczone, że istniał jeszcze jeden sposób, polegający na szybkim ich wytwarzaniu, znacznie przewyższającym tempo degradacji.

Tworzenie się polimerów pod wpływem ciepła wykazał Fox (1969). Stwierdził, że już samo ogrzewanie mieszaniny aminokwasów w temperaturze powyżej 100°C wystarczająco sprzyja powstawaniu peptydów zarówno o krótkich, jak i długich łańcuchach. Owe warunki, konieczne, aby nastąpiła termiczna polimeryzacja aminokwasów, nie różnią się bardzo od tych, które okazują się korzystne także dla abiotycznej syntezy aminokwasów. Tak więc, w rozgrzanych gazach czynnych wulkanów zawierających NH_3 , CH_4 i parę wodną z dużym prawdopodobieństwem mogło dojść do utworzenia aminokwasów, które uległyby następnie, na gorących pyłach wulkanicznych, polimeryzacji odwadniającej do polipeptydów. Przypuszczalnie tak powstające polimery podlegały wypłukaniu z pyłów przez opady atmosferyczne, by w konsekwencji znaleźć się w wodach na powierzchni Ziemi. Autor tej koncepcji (Fox 1969) nie wyjaśnia jednak, jak zsyntetyzowane cząsteczki, a później makromolekuły „radziły sobie” w warunkach lądowych z promieniowaniem UV. Ponadto wydaje się, że w procesie stygnięcia materiału wulkanicznego zbyt krótko miał on optymalną temperaturę dla zajścia polimeryzacji. Problemem mogło być też oczekiwanie na deszcz, który teoretycznie winien padać w tym czasie nieustannie i szybko przenieść powstałe produkty do większych zbiorników wodnych, na bezpieczną, ponad 10-metrową głębokość. Jednakże 3,5 mld lat wstecz ulewy mogły nie być już tak częste i intensywne jak około 500 mln lat wcześniej, kiedy napełniały się baseny oceaniczne.

Oligo- i polipeptydy

Powstanie aminokwasów na prebiotycznej Ziemi okazało się istotnym etapem w ewolucji biochemicznej. Jednak dopiero zajście dalszych ciągów reakcji, prowadzących do utworzenia biopolimerów, na przykład białek, miało istotne znaczenie dla życia.

Białka są najobficiej występującymi cząsteczkami organicznymi w komórkach. Stanowią co najmniej 50% ich suchej masy i pełnią podstawową rolę w odniesieniu zarówno do struktury, jak i funkcji komórki, gdyż są makromolekularnymi wyrazicielami informacji genetycznej. Ponadto, wszystkie one zawierają: węgiel, wodór, azot i tlen, a w większości również siarkę. Ich jednostki strukturalne to zaledwie 20 różnych, wyłącznie α -aminokwasów. Wszystkie białka składają się z: α -atomów węgla ($^{\circ}C$), grupy aminowej

(H₂N), karboksylowej (COOH), wodoru i łańcucha bocznego – grupy R. Tak zwane reszty aminokwasów, połączone kowalencyjnie wiązaniami peptydowym, tworzą długie, nierozgałęzione polimery zbudowane z co najmniej 100 do 1000, a przeciętnie z kilkuset reszt aminokwasowych. W zależności od ułożenia sekwencji aminokwasowych wyróżnia się białka proste, składające się tylko z aminokwasów, i złożone, mające część białkową (amino-kwasy) i niebiałkową, czyli organiczne lub nieorganiczne grupy prostetyczne (nieaminokwasowe składniki). Białka złożone można klasyfikować na podstawie chemicznego charakteru ich grup prostetycznych. Wyróżniamy zatem: nukleoproteidy, lipoproteidy, metaloproteidy, fosforoproteidy, glikoproteidy. Podczas hydrolizy kwasowej, w środowisku kwaśnym, podczas podgrzania lub z udziałem enzymów, z cząsteczki białka uzyskujemy aminokwasy; te same, które syntetyzujemy z substratów pochodzenia abiotycznego.

Białka charakteryzuje różnorodność funkcji biologicznych. Największy i najważniejszy ich typ stanowią enzymy. Katalizują one większość reakcji chemicznych zachodzących w komórce. Drugi typ stanowią białka pełniące rolę elementów strukturalnych. Łączą one grupy komórek, biorą udział w tworzeniu struktur tkankowych, a z polarnymi tłuszczowcami formują zrąb strukturalny dla różnych błon komórkowych. Kolejny ich typ działa jako istotny element w układach kurczliwych i ruchowych. Ponadto, cząsteczki te pełnią funkcję transportową, ochronną (immunologiczną), stanowią materiał zapasowy, wchodzą w skład niektórych hormonów, a także odznaczają się silnie toksycznym działaniem, na przykład rycyna. Niezależnie od tych licznych możliwości wszystkie one składają się z tych samych, 20 standardowych aminokwasów, które jako pojedyncze cząsteczki nie odznaczają się ani aktywnością biologiczną, ani toksycznością! Ich specyficzna aktywność wynika zatem z równie wyjątkowej sekwencji aminokwasów w łańcuchach polipeptydowych. Teoretycznie, liczba możliwych sekwencji aminokwasów, a tym samym i białek, jest nieograniczona. Podobnie jak z 24 liter alfabetu możliwe jest utworzenie ogromnej liczby wyrazów, tak z 20 różnych aminokwasów, stanowiących „alfabet” struktury białek, może powstać olbrzymia i zróżnicowana ich liczba. Łatwo obliczyć, że z wykorzystaniem 12 aminokwasów można uzyskać 10³⁰⁰ białek o średniej masie cząsteczkowej! Zdumiewającą liczbę 20! (20 silnia) daje już polipeptyd zbudowany z 20 różnych aminokwasów, z których każdy występuje tylko jednokrotnie. I właśnie z tych powodów pierwotnie uważano, że to białka musiały stanowić makromolekuły wyjściowe dla pierwszych organizmów żywych.

Fox (1959, 1969) oraz Fox i in. (1959) zaobserwowali tworzenie się polimerów zbliżonych do polipeptydów w warunkach odpowiadających pier-

wotnej Ziemi. Poddawali oni aminokwasy ogrzewaniu lub działaniu wyla-
dowań elektrycznych bądź traktowali je czynnikami kondensującymi, jak
estry polifosforanowe. Produkty tych reakcji jako pierwszy dokładnie opisał
Fox (1965), nazywając je proteinoidami. Chcąc je otrzymać, ogrzewał mie-
szaniny aminokwasów przez 6 godz. w 170°C lub, z polifosforanami, przez
3 miesiące w 50°–60°C. W wyniku obu sposobów postępowania otrzymywał
mieszaninę polimerów zawierającą do 18 różnych aminokwasów i innych
składników nieaminokwasowych, powstających zapewne jako produkt
uboczny. Według niego reakcje przebiegały szybciej w obecności wcześniej
utworzonych mieszanin proteinoidów. Można to uznać za najistotniejszą
obserwację w czasie eksperymentów. Produkty reakcji powodowały zatem,
że szybkość reakcji chemicznych zwiększała się z czasem. Fox stwierdził
ponadto, że proteinoidy łatwiej tworzą się z mieszaniny różnych aminokwa-
sów niż z jednego ich rodzaju. Niektóre z nich wykazują słabą, lecz zawsze
określoną aktywność hormonalną, koordynującą procesy chemiczne. Wyniki
tych obserwacji sugerują, że w warunkach względnie prostych powstają
spontanicznie łańcuchy polipeptydowe o nieprzypadkowej sekwencji ami-
nokwasów.

Fox z Krampitzem (1964) wykazali następnie, że inkubacja pospolitych
aminokwasów w pH 9,0 powoduje samorzutne pojawianie się proteinoidów
o wysokiej masie cząsteczkowej. Ponadto udowodnili, iż proteinoidy mogą
tworzyć się nieenzymatycznie i to w niskich temperaturach oraz w rozcień-
czonych roztworach.

Warto wspomnieć, że podczas całego szeregu prób laboratoryjnego
otrzymywania białek z wcześniej uzyskanych syntetycznych aminokwasów
znalazła się i taka, w której tworzone łańcuchy polipeptydowe z innych niż
aminokwasy jednostek monomerycznych. Akabori (patrz Lehninger 1979),
autor tego eksperymentu, uważał, że zsyntetyzowana przez niego poliglicy-
na była prekursorem prawdziwych białek. Hipoteza tego uczonego, realna
w aspekcie chemicznym, oznaczałaby, że pierwsze białka powstały nieza-
leżnie od aminokwasowych cegiełek budulcowych. W istocie sugeruje ona
nawet, że wolne aminokwasy wytworzyły się dopiero w wyniku hydrolizy
tego rodzaju polipeptydów. W świetle współczesnej biochemii wydaje się
bardziej prawdopodobne, że najpierw wykształciły się aminokwasy, a z nich
dopiero pierwsze białka.

Jakby jednak nie było, pojedyncze proteinoidy nie istniałyby zbyt długo
w pierwotnym oceanie, gdyby nie istniały sposoby ich utrwalania. W roz-
cieńczonych roztworach wodnych wiązania peptydowe są termodynamicz-
nie nietrwałe. Utworzone niegdyś abiotycznie prymitywne proteinoidy po-
winny były bardzo szybko ulegać rozpadowi hydrolitycznemu w pierwotnej
gorącej „zupie”. W jaki sposób zatem utworzyły się pierwotne makromole-

kuły informacyjne z rozmaitych prostych monomerów? W jaki sposób dany proteinoid mógł podlegać „ulepszeniu” aż do osiągnięcia sekwencji dobrze przystosowanej do przeżycia, jeśli nie istniał żaden sposób zapisywania lub powielania sekwencji aminokwasowych tych „lepszyc” proteinoidów?

Sekwencja aminokwasów w białku jest określana podczas biosyntezy. Dzięki osiągnięciom w dziedzinie genetyki molekularnej wiemy, że kolejność aminokwasów w każdym białku warunkują inne sekwencje mononukleotydowych jednostek strukturalnych w odcinku liniowej cząsteczki kwasu dezoksyrybonukleinowego (DNA), który w procesie transkrypcji utworzył mRNA. Ponieważ kod genetyczny jest trójkowy, danym aminokwasom odpowiadają określone tryplety mononukleotydów w łańcuchu mRNA, zwane kodonami, na przykład TCC, AGC⁴⁰ (więcej na temat kwasów nukleinowych w podrozdz. *Nukleotydy i kwasy nukleinowe*). Proces syntezy polipeptydu na matrycy mRNA nazywa się translacją. Polega ona na rozpoznawaniu przez transportujący RNA (tRNA) z udziałem rybosomów i różnych czynników białkowych kolejnych trójek nukleotydowych, czyli kodonów wyznaczających kolejne aminokwasy w syntetyzowanym polipeptydzie. Jeden kodon odpowiada jednemu aminokwasowi. Sekwencja kodonów warunkująca jeden całkowity łańcuch polipeptydowy nosi nazwę genu. Zatem 1 gen to jedno białko, to jest 1 łańcuch polipeptydowy. Trudno zatem analizować białka bez podstawowej znajomości molekularnych zależności pomiędzy genami i białkami. Struktura i funkcja tych ostatnich wynikają bowiem ostatecznie z ich sekwencji aminokwasowej, determinowanej sekwencją nukleotydów. Do sprawnego przeprowadzania syntezy białek nie wystarczą aminokwasy. Na drodze do utworzenia stanu materii, jakim jest życie, muszą pojawić się jeszcze przynajmniej katalizatory i kwasy nukleinowe oraz struktury błoniaste. Zamkną one całość i stworzą takie warunki, w których te substraty zaczną współdziałać z sobą, zachowując przy tym zdolność do reprodukcji i mutacji, i znowu reprodukcji swoich mutacji.

Katalizatory

Organizmy jednokomórkowe, żyjące współcześnie, do wytworzenia wiązań nietrwałych w wodzie, np.: glikozydowych, estrowych, amidowych i peptydowych, wykorzystują chemiczny czynnik kondensujący w postaci grupy pirofosforanowej ATP (adenozynotrójfosforan). Musimy zatem uwzględnić

⁴⁰ Nukleotydy, podstawowe cegielki budujące kwasy nukleinowe, w skrócie oznacza się pierwszymi literami zasad, które wchodzi w ich skład, np.: A (adenina), G (guanina), C (cytozyna), T (tymina) i U (uracyl).

również taką możliwość, że w abiotycznym procesie wytwarzania pierwszych prymitywnych makromolekuł uczestniczyły polifosforany lub inne abiotyczne czynniki kondensujące. W warunkach pierwotnej Ziemi rolę taką pełniłyby samorzutnie powstałe: kwas cyjanowy, dicyjan, fosforan cyjanowinyłu, polimetafosforan, ester etylowy polifosforanu, cyjanoacetylen. Calvin (1969) zwrócił uwagę, że prekursorem wymienionych substancji jest HCN. Stwierdził on, że cyjanoamid, tworzący się z HCN pod wpływem energii promieniowania, w warunkach pierwotnej Ziemi ulegał dimeryzacji, dając dicyjanodiamid, czyli cyjanoguanidynę. Ona z kolei łatwo przekształcała się w pochodną karbondiimidową, między innymi odwadniającą spolimeryzowane łańcuchy. Z udziałem pochodnych karbondiimidu bez trudu z aminokwasów tworzą się: proste peptydy, alkohole, estry fosforanowe, pirofosforany i ortofosforany, a także ADP (adenozynodifosforan) z AMP (adenozynomonofosforan) i fosforanu.

Najbardziej zastanawiają pochodne kwasu polifosforowego, gdyż one przypuszczalnie poprzedzają pojawienie się ATP. Polifosforany mogły tworzyć się z ortofosforanów pod działaniem azotowych czynników kondensujących, na przykład cyjanoguanidyny lub organicznych związków fosforylujących, na przykład fosforanu cyjanowinyłu, powstającego w reakcjach fosforanu z cyjanoacetylenem. Stanowi on jeden z głównych produktów oddziaływania wyładowań elektrycznych na mieszaninę metanu i azotu. Jeżeli zmiesza się fosforan cyjanowinyłu z nieorganicznym ortofosforanem w rozcieńczonym roztworze wodnym, to tworzy się pirofosforan. Lehninger (1979) stwierdził ponadto, że polifosforany pod wpływem promieniowania UV lub łagodnie ogrzewane powodują pojawianie się polipeptydów z aminokwasów. Estry polifosforanów, jak wykazali Schramm i Ponnampertuma (patrz Lehninger 1979), pobudzają również wytwarzanie: AMP, ADP i ATP z adeniny, rybozy i fosforanu, polinukleotydów z mononukleotydów oraz polimerów glukozy z glukozy. Polifosforany reagują z wodą bardzo powoli, ponieważ są kinetycznie trwałe. Wartość reakcji hydrolizy jest silnie ujemna, są więc równocześnie termodynamicznie nietrwałe. Prawdopodobnie właśnie ze względu na te zalety chemiczne nastąpiła selekcja zawartej w ATP grupy polifosforanowej jako biologicznego czynnika kondensującego.

Cząsteczki wody dostarczały najprostszych znanych nam katalizatorów, mianowicie jonów H^+ i OH^- , powodujących specyficzną katalizę kwasową lub zasadową w pierwotnym oceanie (Lehninger 1979). Katalizatory aminokwasowe pojawiły się po abiotycznym utworzeniu pierwszych związków organicznych. Bardzo możliwe, że stanowiły je proste peptydy z grupą amoniową lub karboksylanową. Ewolucja takiego peptydu do bardziej aktywnego katalizatora mogła polegać na selekcji takich modyfikacji w strukturze peptydu, które ze względu na lepsze właściwości katalityczne, a więc

i większą zdolność oddziaływania na środowisko, czyniły tę strukturę trwalszą. Prekursorami enzymów mogły też być proteinoidy. Fox (1969) w swoich doświadczeniach w dwóch przypadkach obserwował działanie katalityczne z regeneracją katalizatora. Dla proteinoidów zawierających cynk wykazał ich aktywność podobną do ATP.

Cairns-Smith (1985) zauważył, że proste cząsteczki organiczne ulegają polimeryzacji pod wpływem promieniowania ultrafioletowego lub wyładowań elektrycznych. Minerale ilaste, na przykład kaolinit czy montmorillonit, z regularnie uporządkowanymi kryształami, powstające w procesie wietrzenia bazaltów i innych skał wylewnych, mogły być dogodną matrycą, na której dochodziło do syntezy polimerów organicznych. Wykazano doświadczalnie, że w obecności minerałów ilastych synteza związków organicznych, w tym cukrowców, tłuszczowców i peptydów, zachodzi miliony razy szybciej⁴¹ niż w roztworze. Pełnią one więc funkcję skutecznych katalizatorów przemian chemicznych, z syntezą organiczną włącznie. Według przypuszczeń szkockiego chemika, Cairns-Smitha, pierwotne polimery, których syntezę przeprowadzały glinokrzemiany, składały się nie tylko z cukrów, ale i reszt fosforanowych stanowiących rdzeń kwasów nukleinowych.

Gunter Wächtershäuser w roku 2000 wysunął hipotezę, że wiele reakcji chemicznych istotnych dla procesu biogenezy mogło zachodzić na powierzchni kryształów pirytu (FeS_2). Naładowana dodatnio powierzchnia przyciągałaby jony fosforanowe i wspomagałaby katalizę polimerów fosfocukrowych. Przeprowadzane na niej reakcje wykazywały większą wydajność, gdyż łatwiej niż w przestrzeni dochodziło tu do spotkań monomerów. Wächtershäuser nie wyklucza, że struktura powierzchni pirytu wymuszała reakcje reszt fosforanowych z rybozami (składnik kwasu nukleinowego).

Tak więc substancje organiczne powstałe w warunkach braku tlenu i organizmów stopniowo gromadziły się w praoceanie. Jak wykazał Ilya Prigogine (1978), możliwe było stopniowe komplikowanie się układów biochemicznych i wyłonienie się z chaotycznej mieszaniny uporządkowanych struktur. Polimery organiczne, o własnościach autokatalitycznych, powielałyby się cyklicznie same.

Trudno jednak będzie udowodnić funkcje katalityczne minerałów w kopalnym materiale, ponieważ najstarsze skamieniałości, jakimi dysponujemy, korzystały już z katalizatorów organicznych. Natomiast przedkomórkowe struktury miały niewielkie szanse na zachowanie się w formie skamieniałości. Toteż mało prawdopodobne jest znalezienie prakomórek z pozostałościami glinokrzemianów czy pirytu.

⁴¹ W obecności dzisiejszych enzymów utworzonych przez długie, przestrzenne łańcuchy polipeptydowe szybkość reakcji chemicznych potęgowana jest od 10^8 do 10^{12} razy.

Na koniec jeszcze jedna wątpliwość. Makromolekuły powstałe w sposób opisany, zarówno te o dłuższych, jak i krótszych łańcuchach, tworzyłyby się losowo na nieorganicznych matrycach, czyli powierzchniach minerałów. W konsekwencji i kolejności aminokwasów w białkach, w tym organicznych katalizatorach, czy nukleotydów w kwasach nukleinowych byłyby przypadkowe. Zatem ich właściwości pozostałyby nieprzewidywalne. Tak więc stopniowe ulepszanie chociażby prymitywnych katalizatorów peptydowych aż do dzisiejszych cząsteczek enzymów po prostu nie nastąpiłoby bez istnienia jakiejś postaci matrycy zdolnej do powielania sekwencji aminokwasowych. Powtarzalność struktury białek zapewnia bowiem synteza łańcucha aminokwasów na podstawie sekwencji kodonów DNA w genie.

Próbując sprostac wyłącznie okazjonalnemu tworzeniu się makromolekuł, zaczęto zastanawiać się nad modelem, który pokazałby przejście od cząsteczkowego chaosu panującego w prebiotycznej „zupie” do prostych wielocząsteczkowych i samopowielających się systemów, w których współpracują enzymy i kwasy nukleinowe (RNA).

Nukleotydy i kwasy nukleinowe

Powodzenie istnienia postępowych struktur, o których była mowa w poprzednich dwóch podrozdziałach), zależy zatem od istnienia niezawodnego nośnika, który mógłby te instrukcje weryfikować i przechowywać. Wszystkie znane nam organizmy posługują się jednym kodem zapisu tych informacji. Mamy więc prawo sądzić, że nasz wspólny przodek, który był zaopatrzony w jego najlepszy wariant, osiągnął sukces w walce z innymi formami, które z nim współwystępowały.

Zgodnie z głównym dogmatem genetyki molekularnej: „informacja genetyczna płynie z DNA na RNA i na białka”. Dogmat ten potwierdza obecność mRNA oraz wykazuje, że sekwencja nukleotydów w genie stanowi liniowy odpowiednik sekwencji aminokwasów w tworzonego białku. W coraz lepiej poznawanym procesie przekazywania i przechowywania informacji genetycznej obecnie wyróżnia się trzy główne etapy.

Pierwszy z nich to replikacja, czyli kopiowanie DNA w celu wytworzenia identycznych cząstek potomnych. Na każdym starym łańcuchu podwójnej spirali DNA jest syntetyzowany komplementarny, nowy łańcuch DNA. Obie nowo powstające cząsteczki mają więc jeden łańcuch stary i jeden nowy. Proces replikacji przebiega bardzo precyzyjnie i stanowi podstawę przekazywania identycznej informacji genetycznej do nowych komórek i pokoleń osobników. Błędy w nim mogą prowadzić do powstawania mutacji.

Drugi etap, zwany transkrypcją, polega na przepisaniu informacji genetycznej zawartej w DNA w formę RNA⁴². Przebiega on w komórkach dzięki polimerazie RNA i podlega mu tylko jedna nić DNA, wybrana według niepoznanego jeszcze mechanizmu. W wyniku transkrypcji powstają cząsteczki RNA należące do czterech głównych rodzajów: (1) RNA zawierający informację o sekwencji aminokwasów w cząsteczce białka, określany jako informacyjny kwas rybonukleinowy (mRNA), który służy do tworzenia jednego lub kilku białek, następnie rozpada się, a w miarę potrzeby syntetyzuje się ponownie⁴³; (2) RNA przenoszący aminokwasy i odczytujący kodony w mRNA, zwany transportowym kwasem rybonukleinowym (tRNA); (3) RNA wchodzący w skład rybosomów – struktur komórkowych, w których odbywa się proces translacji, oznaczany jako rybosomowy kwas rybonukleinowy (rRNA); (4) małe cząsteczki RNA pełniące ważną funkcję w regulacji transkrypcji.

Translacja jako ostatni z trzech głównych procesów polega na odczytaniu informacji i zamianie jej na „20-literowy alfabet” budowy białek (proces syntezy białka). Synteza białka na matrycy mRNA – translacja wymaga jednak szczególnej cząsteczki, o cechach adaptora rozpoznającego zarówno kodony w mRNA, jak i odpowiednie, determinowane przez nie aminokwasy. Konieczność istnienia adaptora wynika z faktu, że aminokwasy i zasady azotowe występujące w kwasach nukleinowych zbyt się różnią pod względem struktury chemicznej, by mogły się bezbłędnie „rozpoznawać” i dopasowywać. W komórkach organizmów żywych funkcje pośredników między aminokwasami i zasadami azotowymi (adaptorów) pełni tRNA. Jest to grupa małych cząsteczek RNA (ich łańcuchy liczą 80–90 zasad) o skomplikowanej strukturze przestrzennej, które przedstawione na płaszczyźnie przypominają liść koniczyny. Cząsteczki tRNA na zewnętrznej części jednej ze swoich wysuniętych pętli zawierają trójkę zasad zwaną antykodonem. Za jej pomocą łączą się z komplementarną do niego trójką zasad (czyli kodonem) w mRNA. Na drugim końcu tRNA przyłączony jest natomiast odpowiedni do antykodonu aminokwas. tRNA spełnia więc wymogi stawiane adaptorowi w procesie translacji. Z jednej strony rozpoznaje trójkę zasad oznaczającą aminokwas w mRNA, z drugiej ustawia naprzeciw rozpoznanego kodonu właściwy aminokwas, który łączy się z przeciwległym końcem tRNA.

⁴² Chemicznie RNA różni się od DNA dwiema drobnymi cechami. Po pierwsze, sacharyd wchodzący w skład RNA to ryboza, a nie deoksyryboza jak w przypadku DNA, po drugie, zamiast tyminy (T), występującej w DNA, w RNA w tym samym miejscu znajduje się bardzo podobna do niej zasada zwana uracylem (U). Ponadto, RNA tworzy tylko jeden łańcuch i dlatego nie może on replikować się tak, jak DNA. Proces transkrypcji DNA w RNA przypomina proces replikacji z tą różnicą, że kopiowaniu podlega tylko jedna z dwóch nici DNA.

⁴³ Czas trwania mRNA u bakterii wynosi 2 min.

Przylączenie aminokwasu do właściwego mu tRNA wymaga wybitnie specyficznych białkowych katalizatorów, które potrafią rozpoznać i połączyć z sobą właściwy tRNA i aminokwas. W procesie translacji, który nie odbędzie się bez odpowiedniego ustawienia w przestrzeni zarówno mRNA, jak i tRNA połączonego z aminokwasami, musi uczestniczyć struktura supramolekularna zdolna do precyzyjnego zorientowania w stosunku do siebie wielu składników. Strukturą tą jest rybosom, stanowiący złożony kompleks kilku rodzajów rybosomowego RNA i kilkudziesięciu różnych białek.

Ten uproszczony opis przebiegu syntezy białek w żywych komórkach pokazuje, jak długą drogę będą jeszcze musieli pokonać naukowcy od już poznanych metod syntezy związków organicznych czy nawet biomolekuł z materii nieorganicznej do laboratoryjnego „wymuszenia” na tych cząsteczkach samoorganizowania się i samopowielania. Wydaje się, że prawdziwym sukcesem będzie przeprowadzenie syntezy makromolekuł na dowolnym stopniu komplikacji, w której punktem wyjścia będzie uprzednio abiotycznie zsyntetyzowany kwas nukleinowy.

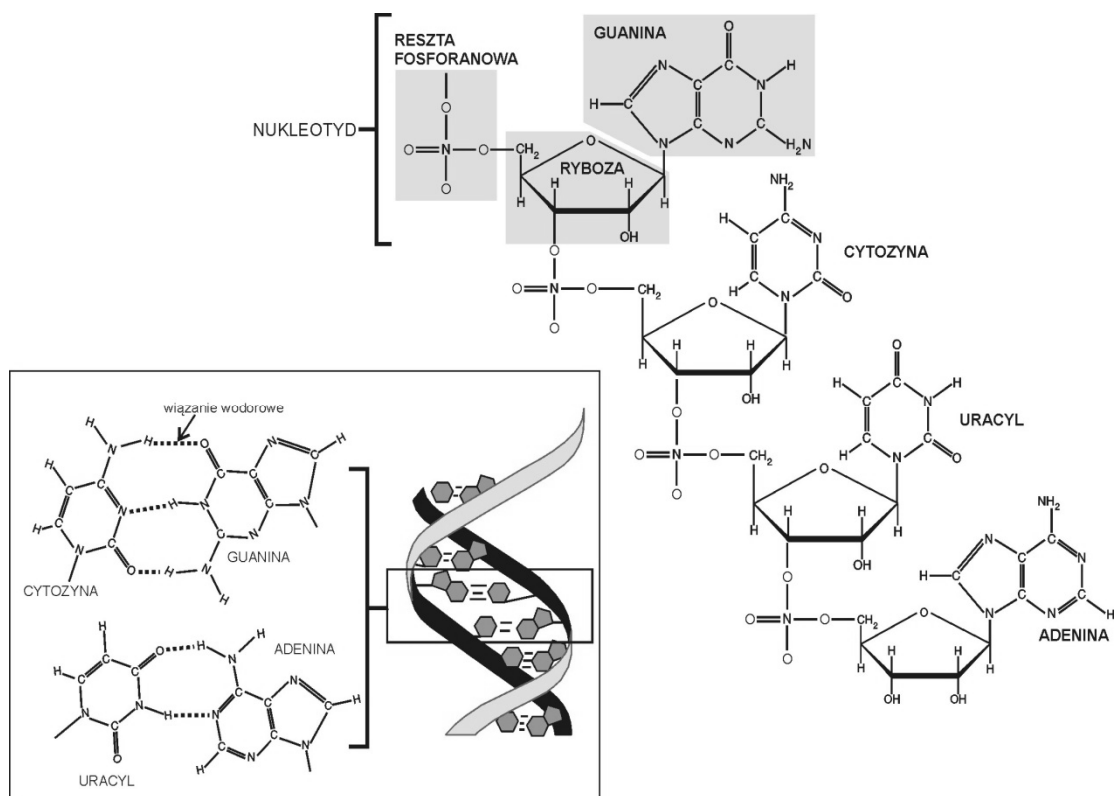
Wyobraźmy sobie prebiotyczną Ziemię i zachodzące na niej cztery etapy syntezy białek. Najpierw dochodzi do aktywacji aminokwasów, która wymaga czynnych tRNA, aminokwasów i ATP. Następnie odbywa się tworzenie kompleksu inicjującego, który zapoczątkowuje łańcuch polipeptydowy. Na tym etapie pierwszy tRNA łączy się z mRNA. Wówczas rybosom rozpada się na dwie różnej wielkości podjednostki. Mniejsza wiąże się z mRNA, tworząc kompleks inicjujący, a następnie, po przyłączeniu się do nich większej podjednostki, powstaje funkcjonalny rybosom. Trzeci etap polega na wydłużaniu łańcucha peptydowego. Ostatni, czwarty etap to zakończenie tworzenia łańcucha – sygnał „stop” pochodzi z mRNA, który odłącza się od rybosomu.

Zatem, ten skomplikowany proces syntezy białek nie zaistniałby, gdyby nie wytworzył się molekularny mechanizm przechowywania, replikacji i transkrypcji informacji genetycznej, na podstawie którego możliwa byłaby synteza wszystkich makromolekuł, w tym także samego nośnika informacji zbudowanego z nukleotydów. One to bowiem bezpośrednio stanowią o formie i właściwościach układów żywych, a w obecnym skomplikowanym świecie odpowiadają również za metabolizm pośredni i przetwarzanie energii. W komórce kwasy nukleinowe pełnią także rolę nośników energii i koenzymów⁴⁴ niektórych reakcji komórkowych. Chodzi tu zatem o zdarzenie bardzo znamienne. Uchwycenie tego momentu w dziejach życia wyznaczy nam bowiem początki ewolucji biologicznej. Wobec tego zastanowić

⁴⁴ Koenzym to niebiałkowa część białka złożonego, będącego enzymem; najczęściej tworzą ją nukleotydy pirydynowe, witaminy, grupy hemowe.

powinna nas kwestia, czy kwasy nukleinowe równie łatwo zsyntetyzować jak wspomniane białka?

Przyjrzyjmy się zatem bliżej elementarnym jednostkom kwasów nukleinowych. Nukleotydy, bo o nich mowa, zbudowane są z zasady azotowej, pięciowęglowego cukru i kwasu fosforowego (ryc. 10). W nukleotydach wyróżnia się: dwa rodzaje zasad azotowych – puryny (adenina i guanina) oraz pirymidyny (uracyl, tymina i cytozyna), jedną cząsteczkę cukrowca – rybozy lub dezoksyrybozy oraz jedną cząsteczkę kwasu fosforowego. Nukleotydy zawierające rybozę nazywa się rybonukleotydami, a zawierające dezoksyrybozę – dezoksyrybonukleotydami. Rybonukleotydy mogą zawierać: cytozynę, uracyl, adeninę lub guaninę, natomiast dezoksyrybonukleotydy składają się z: cytozyny, tyminy, adeniny i guaniny. Jeśli poddać nukleotydy częściowej hydrolizie w taki sposób, aby została uwolniona tylko grupa fosforanowa, to powstaną nukleozydy. Wyróżnia się dwa rodzaje nukleozydów – rybonukleozydy oraz dezoksyrybonukleozydy.



Ryc. 10. Budowa RNA

Mononukleotydy⁴⁵ pełnią wiele funkcji: ATP (adenozynotrójfosforan) służy jako koenzym przenoszący energię chemiczną w komórce, UDP (urydynodifosforan) przenosi reszty cukrowe w syntezie wielocukrowców, FMN (mononukleotyd flawinowy) stanowi ważny koenzym oksydoredukcyjny, uczestniczący w oddychaniu komórkowym. Jednak największe i najwszechstronniejsze znaczenie dla istnienia logiki molekularnej w żywych komórkach mają mononukleotydy połączone mostkami fosforanowymi, czyli oligo- i polinukleotydy, które zawierają odpowiednio kilka lub wiele takich jednostek. Polinukleotydy utworzone z jednostek dezoksyrybonukleotydowych noszą nazwę kwasów dezoksyrybonukleinowych (DNA). Natomiast łańcuchy zbudowane z rybonukleotydów określa się mianem kwasów rybonukleinowych (RNA). DNA przechowuje informację genetyczną oraz charakteryzuje się swoistym składem i sekwencją zasad. Choć zostało ono odkryte i wyizolowane już w 1869 r., przez niemieckiego badacza Friedricha Mieschera (patrz James 1970), dopiero w roku 1943 Oswald Avery udowodnił, że DNA zawiera informację genetyczną. Później wykazano, iż różne gatunki mają odmienne DNA. Opis jego budowy rozpoczął się od ilościowego oznaczenia składu jego zasad, którego dokonali: Chargaff (1950, 1951), Chargaff i in. (1949, 1951, 1952) oraz Tamm i in. (1953). Wykazali oni ponadto, że różne tkanki jednego organizmu mają tak samo skomponowany DNA, w dodatku unikalny dla osobników tego samego gatunku, niezależnie od ich wieku czy stanu odżywiania się. Oprócz tego prawie zawsze w cząsteczce DNA występuje taka sama liczba reszt adeniny i tyminy oraz guaniny i cytozyny ($A = T$ i $G = C$). Tym samym sumy reszt purynowych i pirymidynowych ($A + G = C + T$) są sobie równe⁴⁶. Wreszcie Chargaff i in. (1949, 1951, 1952) wykazali, że cząsteczki DNA gatunków blisko spokrewnionych charakteryzują się podobnym składem zasad. Zatem może on służyć jako taksonomiczna podstawa klasyfikacji organizmów. Część wyników uzyskanych przez wspomnianych autorów przedstawiono w tabeli 7.

Nas jednak interesuje przede wszystkim, czy ta cząsteczka, z jednej strony tak prosta, z drugiej o niewyobrażalnej „pojemności” informacyjnej i wszechstronnych możliwościach, mogła powstać spontanicznie na wczesnej Ziemi. Prostota jej budowy sugeruje, że takie organiczne cegielki budulcowe mononukleotydów, jak zasady azotowe i ryboza mogły się tworzyć w warunkach pierwotnej Ziemi.

⁴⁵ Cząsteczka budulcowa kwasu nukleinowego złożona z: cukru – pentozy (w DNA zwaną deoksyrybozą, w RNA rybozą), reszty fosforanowej i zasady azotowej (adeniny, guaniny, cytozyny, tyminy lub uracylu).

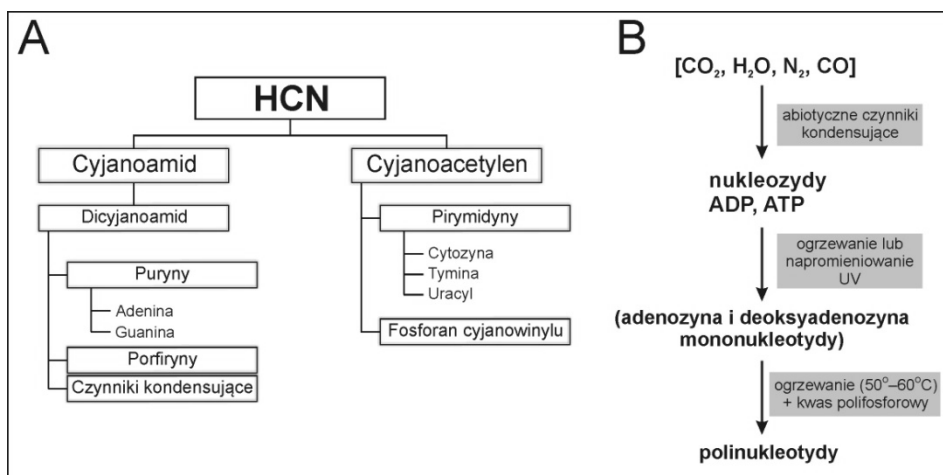
⁴⁶ Rezultaty tych analiz znane są jako reguły Chargaffa. Wynika z nich, że wystarczy znać udział procentowy tylko jednego z czterech nukleotydów (np. A), aby ustalić procentowy udział wszystkich pozostałych trzech nukleotydów (T, C, G) w analizowanej cząsteczce DNA.

Tabela 7. Zawartość zasad w DNA niektórych gatunków (Lehninger 1979)

Organizm	Skład zasad [liczba moli w %]				Stosunek zawartości zasad			Stosunek (A + T) (G + C)
	A	G	C	T	A/T	G/C	Pur/Pir	
Człowiek	30,9	19,9	19,8	29,4	1,05	1,00	1,04	1,52
Owca	29,3	21,4	21,0	28,3	1,03	1,02	1,03	1,36
Kura	28,8	20,5	21,5	29,2	1,02	0,95	0,97	1,38
Łosoś	29,7	20,8	20,4	29,1	1,02	1,02	1,02	1,43
Drożdże	31,3	18,7	17,1	32,9	0,95	1,09	1,00	1,79
Pszenica	27,3	22,7	22,8	27,1	1,01	1,00	1,00	1,19
<i>E. coli</i>	24,7	26,0	25,7	23,6	1,04	1,01	1,03	0,93
ΦX174	24,6	24,1	18,5	32,7	0,75	1,30	0,95	1,34

W doświadczeniach naśladujących te pierwotne warunki, zwłaszcza w obecności abiotycznych czynników kondensujących, wykryto abiotyczne tworzenie się nukleozydów takich, jak adenozyne i dezoksyadenozyne (ryc. 11). Co więcej, jeśli ogrzewa się lub napromieniowuje światłem UV nukleozydy, to powstają mononukleotydy. W symulowanych warunkach pierwotnej Ziemi otrzymywano również ADP i ATP. Ogrzewając mononukleotydy w 50°–65°C, w obecności kwasu polifosforowego jako czynnika kondensującego, doprowadzono do wytworzenia wiązań łączących kolejne mononukleotydy. Najbardziej odkrywcze spośród przeprowadzonych doświadczeń polega na wykazaniu, że jeśli zmiesza się roztwory prostych pochodnych adeniny i uracylu, niezawierające rybozy ani kwasu fosforowego, to następuje samorzutne utworzenie się kompleksu adenina-uracyl (Felsenfeld, Miles 1967; Ts'o 1974).

Pochodne cytozyny i guaniny w roztworze będą także wytwarzały kompleksy mieszane. Pary cytozyna-adenina i uracyl-guanina, choć powstają, to należą jednak do związków nietrwałych. W różnych mieszaninach adenina zawsze wybiórczo dąży do utworzenia kompleksu z uracylem, a guanina z cytozyną. Zatem do specyficznego łączenia się zasad w pary nie są wymagane ani reszty cukrowe, ani reszty fosforanowe. Łańcuch polinukleotydowy może więc działać jako matryca do związywania wolnych mononukleotydów na zasadzie komplementarności. Jak wykazał Orgel (1968, 1992), uznany autorytet wśród ewolucjonistów, związane na matrycy mononukleotydy wytwarzają wiązania międzynukleotydowe pod działaniem abiotycznych czynników kondensujących. Skoro dzisiaj jedną ze wspólnych cech całego świata organicznego jest taki sam kod genetyczny, przydatność tak wyselekcjonowanych wówczas biomolekuł musiała być wyższa niż innych, a przeżywalność zawierających je komórek większa.



Ryc. 11. Synteza kwasów nukleinowych; A – naturalna, komórkowa, B – laboratoryjna (wg Lehningera 1979)

Lipidy, błony komórkowe

Istnieje jeszcze jeden warunek niezbędny do zaistnienia żywej komórki – półprzepuszczalna błona komórkowa. Jej zadanie polega nie tyle na ochronie zawartości, co na odizolowaniu jej wnętrza od środowiska. Tylko w izolacji od otoczenia w komórkach mogą zachodzić skomplikowane procesy życiowe zależne od zachowania bardzo precyzyjnych warunków wewnętrznych. Zmiana pH o pół jednostki potrafi na przykład spowodować, że enzymy będą błędnie odczytywać informacje zapisane w genach, a i samo kopiowanie cząsteczek DNA stanie się niemożliwe.

Błony wszystkich znanych układów biologicznych, zdolnych do samodzielnego życia, mają wspólny plan budowy ogólnej. Tworzą je dwa rodzaje cząsteczek chemicznych – lipidy (tłuszcze) i białka. Mimo że u poszczególnych gatunków ich skład jest odmienny, to tylko nieznacznie różnią się właściwościami. Błony komórkowe, których grubość waha się od 6 do 10 nm, zbudowane są, w zależności od rodzaju, w około 40–90% wagowych z lipidów i w 10–60% z białek. Tworzy te, nawet najprostsze, zapewniają komórce względną stałość warunków w niej panujących. Dzieje się tak dzięki ich selektywnej przepuszczalności zapewniającej dostęp tylko niektórym cząsteczkom chemicznym. W komórkach eukariotycznych błony sprawiają też, że poszczególne części komórki charakteryzują się różnym składem chemicznym i sprawnie przeprowadzają przeciwstawne reakcje chemiczne.

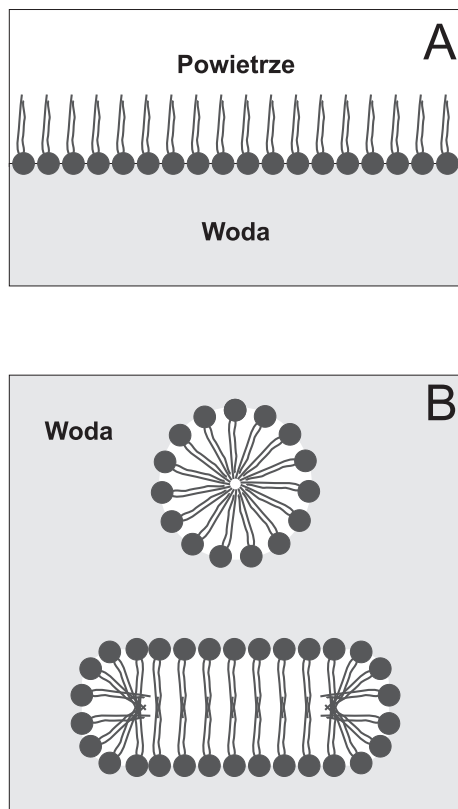
O tym, że błona komórkowa zawsze odgrywała ważną rolę, wiadomo od dawna. Natomiast jak bardzo istotna to rola, potwierdziły ostatnie odkrycia, wykazujące znaczny udział genów w jej budowie. U *Mycoplasma*⁴⁷, jednej z najprostszych bakterii bez ściany komórkowej, której genom, uważany za wzorzec minimum informacji genetycznej, złożony jest zaledwie z 580 tys. nukleotydów stanowiących 470 genów, najwięcej, bo aż 30%, genów służy kodowaniu białek wchodzących w skład błony oddzielającej ten jednokomórkowy organizm od środowiska. Dla porównania: za energetykę komórki odpowiada 31 genów (9,7%), za powielanie DNA – 32 geny (10,0%), za biosyntezę białek – 101 (31,8%). Ponadto, funkcjami regulacyjnymi zajmuje się tylko 7 genów (2,2%), a w naprawie uszkodzeń DNA uczestniczy 31 (9,7%) genów.

Skoro syntezę błon w najprostszym znanym nam organizmie kontroluje tak znaczna liczba genów, to należałoby zapytać, jaka była kolejność powstawania elementów podczas integracji protokomórki? Czy białko, informacja genetyczna, metabolizm, błony komórkowe następowały po sobie, czy też szereg ten był zupełnie inny? Jak do tej pory kwestia ta pozostaje w sferze spekulacji.

Wiemy już, że aminokwasy i nukleotydy są w stanie powstać z abiotycznych substratów w stosunkowo prostych reakcjach. Czy również błony mogły pojawić się niezależnie od pozostałych składników komórki? Istnieje duże prawdopodobieństwo, że odpowiedź jest twierdząca. Lipidy w błonach należą do trzech klas: fosfolipidów, glikolipidów i lipidów obojętnych (sterole). Podstawową strukturę błony tworzy dwuwarstwa lipidowa, utworzona z fosfolipidów. Specyficzne połączenia kwasów tłuszczowych w cząsteczkach fosfolipidu sprawiają, że mają one polarne (hydrofilowe) „główki” i niepolarne (hydrofobowe) łańcuchy węglowodorowe („ogony”). Cała cząsteczka wykazuje zatem dwojaki stosunek do wody: „główka” chętnie się nią otacza, a „ogony” przed nią uciekają. Dzięki tej właściwości lipidy w wodzie samorzutnie wytwarzają warstwy o grubości jednocząsteczkowej, rozpościerającej się na granicy faz powietrze-woda (tzw. monowarstwy; ryc. 12A). W roztworach wodnych spontanicznie tworzą się jeszcze inne struktury agregacyjne, na przykład dwuwarstwy – formy lamelarne, czy micle – kuliste, lub cylindryczne formy strukturalne, z polarnymi „główkami” ustawionymi na zewnątrz i apolarnymi „ogonami” skierowanymi do wnętrza (ryc. 12B). Łatwo też powstają warstwy dwucząsteczkowe.

Tego typu podwójne warstwy fosfolipidowe mają już właściwości zbliżone do naturalnych błon komórkowych. Fosfolipidy w roztworach wodnych spontanicznie tworzą takie podwójne warstwy. Co istotne, dla ich utrzymania nie potrzeba żadnego wkładu energii. Kiedy cząsteczki fosfoli-

⁴⁷ Pasożytnicze bakterie wywołujące u ludzi wiele chorób, m.in. zapalenie płuc.



Ryc. 12. Struktury agregacyjne fosfolipidów: A – pojedyncza warstwa na granicy faz powietrze-woda (Lehninger 1979), B – micelle w wodzie

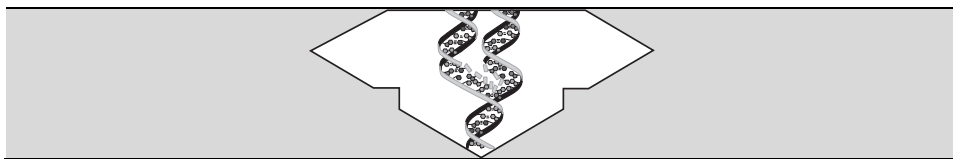
pidów wrzuci się do wody i porządnie pomiesza, to po chwili na powierzchni same stworzą najprostszą błonę, czyli dwuwarstwę lipidową. Wydaje się zatem, że już same właściwości wynikające z budowy tych związków „wymusiły” podczas ewolucji właśnie ich wybór do budowy błon komórkowych. Były to bowiem struktury najprostsze, przy tym energooszczędne, a więc zgodne z molekularną logiką życia.

Skoro tworzenie prostych błon biologicznych nie stanowi skomplikowanego procesu – wystarczy obecność lipidów, by reszta działa się sama – to nasuwa się pytanie: Czy lipidy były obecne w pierwotnym oceanie i czy możliwa jest ich pozakomórkowa synteza? Otóż wiele współczesnych kwasów tłuszczowych pochodzi od kwasu palmitynowego, należącego do nasyconych wyższych kwasów tłuszczowych. Ten z kolei, co wykazano, powstaje stosunkowo łatwo z nieorganicznych związków, jakie występowały także na pierwotnej Ziemi. Zauważono również, że w obecności minerałów ila-

stych synteza między innymi tłuszczowców zachodzi tysiące razy szybciej niż w roztworze. Lipidy zatem, podobnie jak aminokwasy, cukry i nukleotydy, we wczesnym oceanie musiały mieć równie znaczny udział w zagęszczaniu „pierwotnego bulionu” jak pozostałe biomolekuły.

Kolejny etap ewolucji zewnętrznych struktur ograniczających cytoplazmę polegał na wytworzeniu ściany komórkowej. Powierzchnie dzisiejszych komórek prokariotycznych i eukariotycznych pokrywa otoczka różnej grubości, zbudowana z cukrów o różnym stopniu polimeryzacji. W komórkach zwierzęcych taka warstwa cukrowców pokrywająca ich powierzchnię nosi nazwę glikokaliks. Ten sztywny „płaszcz” stanowi ważny element ochrony powierzchni komórki przed uszkodzeniem chemicznym i mechanicznym, jak również zapobiega pęcznieniu i przerwaniu błony cytoplazmatycznej. Budulcem ścian komórek roślinnych jest wielocukier celulozy, który jednocześnie stanowi ich zasadniczy element szkieletowy, określający ich kształt, przeciwstawiający się dużemu ciśnieniu osmotycznemu wnętrza komórki. Z kolei błonę komórkową bakterii otacza gruba ściana komórkowa zbudowana z kowalencyjnie powiązanych łańcuchów polisacharydowych i polipeptydowych. Ten sztywny zrąb stanowi jedną wielką, workowatą cząsteczkę – kompleks polisacharydowo-peptydowy zwany mureiną. Struktury te nie odegrały jednak większej roli w prawidłowym funkcjonowaniu organizmu. Większość przedstawicieli królestwa Protista, reprezentowanego głównie przez jednokomórkowe eukarionty uważane za przodków królestwa zwierząt, do dzisiaj z powodzeniem sobie radzi bez ścian komórkowych.

To pobieżne omówienie etapów ewolucji biochemicznej nie prowadzi do prostych wskazówek dotyczących powstania życia. Wciąż pozostaje bez odpowiedzi pytanie: Dlaczego żywy organizm jest czymś więcej niż sumą składników nieożywionych?



POTĘGA MAKROCZĄSTECZEK

Doszliśmy zatem do przełomowego momentu w ewolucji, kiedy dzięki asocjacji pewnej liczby składników makromolekularnych pochodzenia abiotycznego i wytworzenia z nich jedyne w swoim rodzaju układu o wielce spotęgowanej zdolności przetrwania, pojawiły się pierwsze pozory „życia” – LUCA. Jak napisałem w podrozdziale *Historia poglądów*, dotyczącym początków życia, Karol Darwin w ostatnim paragrafie swojego dzieła *O powstaniu gatunków* umieścił zdanie: „Stwórca natchnął życiem kilka form lub jedną tylko. Reszty dokonała ewolucja”. Czy po 150 latach od wyrażenia przez niego tej opinii potrafimy dziś przekonująco wykazać, że życie powstało bez jakiegokolwiek ingerencji z zewnątrz? Czy potrafimy wyjaśnić, jak to jest, że żywa materia, która przecież także składa się z martwych cząsteczek, tak krańcowo różni się od wszystkich systemów, które żywe nie są (i nigdy nie były)?

Mimo że wiedza o mechanizmach rządzących światem przyrody napawa ludzkość dumą, przełomowego odkrycia, które w zadawalający sposób zaspokoiliby nasze pragnienie poznania tych prawd, jeszcze nikt nie dokonał. Zgoda natomiast panuje wśród większości specjalistów zajmujących się zagadnieniami biogenezy, że pierwsza struktura o cechach życia wcale nie musiała być podobna do dzisiejszej komórki. Minimum wymagań polegałoby raczej na tym, aby wspomniana struktura kryła w sobie możliwości ewolucji kompletnej komórki. Oczywiście można spierać się, czy termin „życie” jest na tyle ściśle zdefiniowany, by wyznaczyć jego początek w łańcuchu zdarzeń prowadzących od uprzednio utworzonych składników makromolekularnych do kompletnej komórki.

Chociaż na ogół istnieje zgodność, że minimalnym tu wymaganiem jest makromolekuła informacyjna, jednakże wciąż pozostaje problemem, co za-

początkowało życie – kwasy nukleinowe czy białka? Próba rekonstrukcji tych początków dotychczas napotykała zawsze na dylemat „kury i jaja”. Otóż, współczesne kwasy nukleinowe są syntetyzowane wyłącznie za pomocą białek, a te z kolei powstają tylko wówczas, kiedy istnieje odpowiadająca im matryca w postaci właściwej sekwencji nukleotydów. Przeważające koncepcje wskazujące na następujący porządek: najpierw replikator, później metabolizm sugerują, że replikatory, najprawdopodobniej w postaci RNA, z mechanizmem samopowielania i być może innymi biomolekułami, istniały zanim pojawiły się błony. Jednak znane są również poglądy przeciwnie: najpierw metabolizm, później replikator. Próbuąc rozwikłać ten dylemat, Dyson (1985) zasugerował, że białka i kwasy nukleinowe mogły powstać w odrębnych organizmach, ściślej w strukturach ograniczonych błonami i dopiero później połączyć się. Z pewnością dlatego do dzisiaj wciąż rozpatruje się dwie drogi („białkową” i „genową”), prowadzące do powstania najstarszych organizmów.

Rolę idealnego kandydata na sprawcę życia początkowo przyznano białkom, typowanym już przez Darwina z uwagi na ich możliwości i wszechstronne zastosowanie. Z czasem jednak (od 1944 r.)⁴⁸ koncepcja ta ustąpiła miejsca hipotezie „genowej”. Jak się do niedawna wydawało – jedynej słusznej. Jednak nowe odkrycia, na przykład prionów⁴⁹, zdają się burzyć ten nasz „oczywisty” – ugruntowany obraz o niemożności życia bez kwasów nukleinowych.

Hipotezy białkowe

Do wyobrażeń Darwina – autora koncepcji o beztlenowej kreacji życia – w roku 1924 nawiązał Oparin. Sformułował on pogląd, według którego pierwsze komórki, nazwane przez niego protobiontami, powstały w ten sposób, że dookoła jednej lub kilku makromolekuł, przypuszczalnie białek, przejawiających aktywność katalityczną, wytworzyła się linia graniczna, czyli błona. Autor tej hipotezy zaproponował, że faza komórkowa mogłaby powstać w procesie koacerwacji. Jest to zjawisko, które występuje w wodnych roztworach polimerów w wysokim stopniu uwodnienia. Polega ono na tym, że wodny roztwór takiego polimeru, stanowiący jedną fazę ciągłą, ule-

⁴⁸ W 1944 r. Avery, MacLeod i McCarty udowodnili, że nie białka, lecz DNA jest nośnikiem informacji genetycznej.

⁴⁹ Białkowe czynniki chorobotwórcze pozbawione kwasów nukleinowych. Najbardziej znane choroby prionowe, to: scrapie, BSE (Bovine Spongiform Encefalopaty), Creutzfeldt-Jakoba, Kuru.

ga samorzutnie rozdzieleniu na dwie fazy wodne o stosunkowo wysokim i niskim stężeniu polimeru. Dzięki koacerwacji w pierwotnej „zupie” organicznej mogły wytwarzać się mikroskopowe kropelki tej fazy, w której stężenie polimeru jest wysokie (koacerwaty). Oparin postulował, że niektóre z tych kropelek wychwytywały ze środowiska pewne małe cząsteczki, na przykład glukozę lub aminokwasy, a także jakiś prymitywny katalizator. Ponadto, zawierając substraty, jak i katalizator, kropelki te przejawiałyby w ten sposób pewien prosty „metabolizm” typu jednej reakcji. Następnie, oddziałując z otaczającym środowiskiem wodnym, pozyskiwały inne związki służące im do wbudowania we własną strukturę. Powodowało to zwiększenie ich rozmiarów, które jednak pozostawały ograniczone względami fizycznymi. W wyniku działania sił zewnętrznych, na przykład wiatru lub falowania, rozpadałyby się na mniejsze kropelki, zupełnie tak samo jak przy wstrząsaniu zawiesiny oleju w wodzie, który ulega wówczas rozproszeniu i tworzy emulsję. Część z tak utworzonych kropelek potomnych zachowywałaby cząsteczki katalizatorów pochodzące z macierzystej kropelki, a więc następowałby „wzrost” nowego ich pokolenia.

Na potwierdzenie swej hipotezy Oparin ze współpracownikami przeprowadzili szereg doświadczeń modelowych na układach podlegających koacerwacji. Stwierdzili oni, że stężone roztwory wodne polipeptydów, polisacharydów czy RNA wytwarzają kropelki koacerwatów otoczone linią graniczną. Kiedy niektóre z nich, zawierające enzym fosforylaze glikogenową, umieszczono w roztworze z węglowodanami, wówczas tworzył się w nich polimer podobny do skrobi.

Jakkolwiek koacerwaty Oparina trudno nazwać organizmami komórkowymi, to uczony ten wykazał, że poszczególne biomolekuły potrafią spontanicznie formować struktury komórkopodobne. Z hipotezy tej wynika też bezpośredni wniosek, że pojawienie się aparatu genetycznego, umożliwiającego dokładną autoreplikację katalizatorów komórkowych, nastąpiłoby dopiero później w ewolucji biologicznej.

W 1965 r. Fox opisał inne samotworzące się struktury komórkopodobne, które nazwał mikrosferami. Te twory, o średnicy 2 μm , powstają spontanicznie, kiedy gorące, stężone roztwory proteinoidów poddaje się w ciągu jednego lub dwóch tygodni powolnemu ochłodzeniu, zachowując pH 3–7 i odpowiednio trwałe stężenie soli. Przy właściwym dobraniu pH zewnętrzna linia graniczna mikrosfer wykazuje dwuwarstwową strukturę przypominającą naturalne błony, ale bez lipidów. Są one przy tym półprzepuszczalne, mogą pęcznieć lub kurczyć się w zależności od środowiska i wtedy dochodzi do ich wzrostu. Natomiast pozostawione na dłużej pączkują, a więc... rozmnażają się. Jakkolwiek mikrosfery nie mają kwasów nukleinowych oraz metabolizmu, niemniej jednak stanowią samoorganizujące się układy. Za-

tem mogą one mieć duże znaczenie jako modele ostatnich wspólnych przodków życia, gdyż tworzą się spontanicznie ze składników, które same powstawały w podwyższonej temperaturze z gazów pierwotnej Ziemi.

Chociaż koncepcje wypracowane przez Oparina i Foxa stały się swego rodzaju paradygmatem protobiologii i wciąż nawiązuje do nich wiele teoretycznych projektów, musimy pamiętać, że sekwencje aminokwasów w protobiontach i mikrosferach pojawiały się przypadkowo i nawet jeśli powstało najlepsze białko, to miało ono krótki czas życia, limitowany indywidualną zdolnością przetrwania tego osobnika. Powtarzalność struktury białek zapewnia bowiem synteza łańcucha aminokwasów na podstawie sekwencji kodonów DNA w genie. Innymi słowy, chociaż takie modele prymitywnych komórek okazują się bardzo prawdopodobne, to ich ewolucja bez udziału układu genetycznego nie mogłaby zbyt daleko postąpić. Co więcej, modele takie wymagają założenia, że zanim mógłby rozwinąć się trwały genom, musiałby dokonać się przepływ informacji od prymitywnych białek do prymitywnych kwasów nukleinowych. Zostałby zatem zainicjowany proces, dla którego dzisiaj nie ma odpowiednika.

Hipotezy genowe

Zgodnie z jedną, niemal powszechnie akceptowaną hipotezą, obecne życie oparte na „DNA–RNA–białko” rozwinęło się z form „RNA–białko”, a te z kolei od zwykłego, replikującego się RNA. Po racjonalnym uzasadnieniu, notabene wciąż takiego nie ma, będzie można przyjąć, że wczesne struktury były w pełni cudzożywne. Otrzymywały bowiem wszystkie składowe ze środowiska. RNA mógł więc przeprowadzać zasadnicze funkcje życiowe za pośrednictwem prostych mechanizmów i drugorzędnych kompozycji RNA (np. tRNA), z wykorzystaniem katalitycznych właściwości minerałów albo ilów (Fortey 1999), bez wpływu białkowych katalizatorów. Obecność określonych cząsteczek mogła przyspieszać reakcje chemiczne w sposób losowy. Jako produkt jednej z takich reakcji pojawiłby się wtedy replikator o właściwościach wywoływania reakcji skutkujących samopowielaniem cząsteczki, co rozpoczęłoby ewolucję.

Koncepcja kluczowej roli katalizatorów RNA we wczesnych formach życia została poparta faktem. Kilka katalitycznych odmian tego kwasu jeszcze dzisiaj wykonuje centralne, biologiczne funkcje w żywych komórkach i przynajmniej niektóre z tych odmian można wyprowadzić od RNA wczesnych form życia jako molekularne relikty. Te proste strategie życia oparte na RNA, które być może przypominają stosowane przez wczesną replikację RNA, współcześnie z powodzeniem wykorzystują wirusy i wiriony. Ich

cząsteczkowe i funkcjonalne własności można zatem zaliczyć do przykładów albo modeli struktur i mechanizmów, które mogły być używane do replikacji wczesnych biopolimerów.

Pierwszym badaczem, który już w 1929 r. zaproponował, aby za początek życia uznać abiotyczne utworzenie się jednego lub więcej genów, był Hermann Muller⁵⁰. Koncepcję tę następnie podjęto w późnych latach 60. ubiegłego stulecia. Wówczas to Woese (1967), Crick⁵¹ (1968) i Orgel (1968), niezależnie, zaproponowali hipotezę, zgodnie z którą jako pierwszy mógł pojawić się RNA mający zdolność do replikacji bez białek i zdolność do katalizowania każdego etapu ich syntezy. Na poparcie tego przypuszczenia czekano 15 lat. W 1982 r. Kruger i in., a następnie Thomas Cech oraz, niezależnie od niego, Sidney Altman i in. (Guerrier-Takada i in. 1983) wykazali właściwości zarówno katalityczne, jak i kodujące kwasu rybonukleinowego (RNA). Dowiedli, że zbudowane z niego enzymy zwane rybozymami (RNAs) potrafią katalizować reakcje chemiczne podobnie jak białka i zarazem zapisywać informację dziedziczną. Fakt, że jako enzym może funkcjonować intron⁵² rybosomalnego RNA, precyzuje więc tezę o pierwszej „żywej cząsteczce”. Mogła nią być replikaza RNA, zdolna do katalizowania swojej własnej replikacji bez pomocy białka. Później potwierdzili to również między innymi tak znani badacze, jak: Joyce i Orgel (1986a, b), Joyce (1987) oraz Weiner i Maizels (1987).

Skoro więc RNA rzeczywiście potrafi przenosić informację genetyczną i zarazem sterować syntezą innych związków chemicznych, to okazuje się idealnym kandydatem na sprawcę życia i pierwszą „żywą cząsteczkę” zdolną do katalizowania swojej własnej replikacji bez pomocy białek. Prebiotyczne RNA w rzeczywistości mogło zatem stworzyć to, co w roku 1986 Walter Gilbert określił „światem RNA”⁵³, w którym wszystkie reakcje katalizował kwas rybonukleinowy. Na gruncie przedstawionej przez tego badacza koncepcji scenariusz „świata RNA” realizowałby się „w siedmiu odsłonach”. Najpierw (1) cząsteczki RNA przejawiające aktywność katalityczną wykorzystują tę zdolność i w prymitywnym „bulionie” budują same siebie. Następnie (2) autoreplikujące się cząsteczki tego kwasu ewoluują, na zasa-

⁵⁰ Amerykański genetyk (1890–1967). W jego propozycji niezwykle było to, że podał ją, nie wiedząc, iż nośnikami informacji genetycznej nie są białka, dokładniej enzymy, tylko kwasy nukleinowe. O tym świat dowiedział się dopiero w roku 1944, po odkryciach Oswalda Avery i in.

⁵¹ Noblista, z Watsonem opisali w 1953 r. strukturę i funkcję DNA.

⁵² Intron – część sekwencji genu niekodująca sekwencji aminokwasów.

⁵³ „Świat RNA” – hipotetyczny świat oparty na genomach RNA i katalizatorach RNAs. W „świecie RNA” pierwotne, samoreplikujące się systemy były złożone z rybonukleinowych kwasów zdolnych przechowywać informacje genetyczne i katalizować reakcje chemiczne, które we współczesnym świecie żywym wykonane są głównie przez białkowe enzymy.

dzie rekombinacji i mutacji, w kierunku wytwarzania nowych funkcji i opanowywania niedostępnych wcześniej siedlisk. Ponieważ replikator nie zawsze jest dokładny i niektóre kopie mogą zawierać błędy, zmiana mogła albo niszczyć możliwość samopowielania, powodując wymieranie danej linii materii organicznej, albo przyczyniać się do szybszego lub lepszego działania replikatora. W konsekwencji formy z drugiej linii, faworyzowane przez środowisko, zaczynały dominować nad tymi nieudanymi. Następnie (3) molekuly RNA rozwijają szereg własności enzymatycznych. W miarę kurczenia się zasobów materiałowych w praocenie, swoistego pożywienia dla replikowanych makromolekuł, pozostawała materia zawierająca cechy, umożliwiające wykorzystanie innych zasobów energii lub zatrzymanie rozwoju innych odgałęzień wczesnego życia przez „wykradanie” ich zasobów. Później (4) cząsteczki RNA zaczynają syntetyzować białka, które jako enzymy pełniły te same funkcje, lecz bardziej efektywnie. W rezultacie (5) powstające w ten sposób enzymy białkowe kodowane są przez tak zwany egzon RNA, stanowiący element współczesnego DNA. W toku dalszej ewolucji (6) aktywna replikaza RNA doprowadza do powstania DNA i przejęcia przez niego funkcji genetycznych. Sam RNA zachowałby rolę przekaźnika informacji dziedzicznej między DNA a produkowanymi białkami. W konsekwencji z powstaniem DNA pojawiłaby się możliwość niemal bezbłędnego przechowywania informacji genetycznej. Wreszcie (7) RNA przestaje odgrywać centralną rolę w ewolucji prebiotycznej i ustępuje miejsca swym własnym wytworom: białkom oraz DNA, które zdolne są do pełnienia w sposób bardziej wydajny jego funkcji.

W konkurencji między pierwszymi replikatorami musiały zatem wygrać te, które jako pierwsze dokonały podziału funkcji, to jest prakomórki, w których rolę nośnika informacji genetycznej przejął kwas dezoksyrybonukleinowy (DNA), a rolę enzymów – białka. Za pamiętkę pierwotnego, niewyspecjalizowanego stanu rzeczy uchodzą prawdopodobnie enzymy białkowe z wbudowanymi nukleotydami, uczestniczące w niektórych starych ewolucyjnie szlakach metabolicznych. Tłuszcze (lipidy) tworzyły zaś błony micelarne (ryc. 12), wyodrębniające mikrośrodowiska chemiczne z otoczenia. W ten sposób powstały protobionty. Te pierwotne struktury odznaczają się prymitywnym metabolizmem i zaczątkową pamięcią genetyczną. Około 3,5 mld lat temu rozwinęły się z nich układy żywe, wykazujące duże podobieństwo do współczesnych organizmów. Zwykle traktuje się je jako formy spokrewnione z organizmami znanego nam świata DNA. Możemy zatem przyjąć, że w tym czasie „świat RNA” tracił już na znaczeniu.

Współcześnie tezę o wcześniejszej aktywności RNA niż DNA w procesach początkujących życie wysuwają między innymi: Joyce (2002), Orgel (2004), Allers i Mevarech (2005), Joyce i Orgel (2006), Benner i in. (2006) czy

Werner (2007). Zwolennicy tego poglądu nie są jednak jednomyślni. Różnią się w rozumieniu roli, jaką mógł pełnić RNA w przedkomórkowym świecie. Benner i in. (2006) podzielili tych autorów na dwie grupy. Do pierwszej zaliczyli twierdzących, że RNA jako komponent kodujący we wczesnych formach życia pełnił funkcje katalityczne; do drugiej tych, którzy uważają, że pierwsze organizmy na Ziemi wykorzystywały RNA wyłącznie do kodowania informacji genetycznej. Jak się wydaje, obecnie istnieją przekonujące dowody wskazujące na rację pierwszej grupy uczonych. Znajdujemy je w procesach biochemicznych zachodzących we współczesnych organizmach żywych (Crick 1968; Visser, Kellogg 1978; Cech 1983, Guerrier-Takada i in. 1983; Benner i in. 1989, 1993; i dalej w tekście). Druga grupa autorów, wyrażająca bardzo śmiało przekonanie, że RNA był pierwszym organicznym systemem chemicznym na Ziemi, podlegającym darwinowskiej ewolucji, znacznie gorzej dokumentuje swój pogląd. W rezultacie ma zdecydowanie mniej zwolenników (Benner i in. 2006).

Choć raczej mało prawdopodobne jest, żeby wkrótce odkryto skamieniałości albo inne fizyczne szczątki „świata RNA”, ponieważ skały tamtego okresu i starsze w większości zostały przetopione lub pochłonięte w strefach subdukcji, stosowane dzisiaj narzędzia do badania ewolucji na poziomie molekularnym pozwalają wnioskować z genomów obecnie żyjących organizmów o genomach ich odległych przodków (Birnbaum i in. 2000, Blanchette i in. 2004). Duży udział w zrozumieniu tych procesów mają nowe dziedziny nauki – eksperymentalna paleogenetyka (Benner i in. 2002) i molekularna inżynieria RNA (Bartel, Szostak 1993; Johns i Joyce 2005; Müller 2006), zajmująca się selekcją *in vitro* (SELEX – Systematic Evolution of Ligands by EXponential enrichment).

Punktem wyjścia do tych eksperymentów było wykazanie, że rybosomalny RNA (rRNA) jest homologiczny u większości współcześnie żyjących organizmów. Rodziny organizmów, wydzielone na podstawie podobieństwa rRNA, pozwoliły zrekonstruować model drzewa filogenetycznego (Woese i in. 1990). Po założeniu, że model jest poprawny, zrobiono następny krok. W eksperymentach paleogenetycznych wykorzystywano możliwości rekombinacyjnej biotechnologii DNA i „wskrzeszano” sekwencje nukleotydów dawnych czynników elongacyjnych⁵⁴ (Benner i in. 2006). Tego typu doświadczenia prowadzące do odtwarzania biomolekuł zakodowanych w dawnych genomach powtarzano wielokrotnie (Malcolm i in. 1990; Stackhouse i in. 1990; Jermann i in. 1995; Gaucher i in. 2003). Paleogenetycy w swoich laboratoriach wymuszali na bakteriach między innymi uaktyw-

⁵⁴ Czynniki elongacyjne – białka wiążące się z polimerazą, odpowiedzialne za dostarczanie m.in. aminoacylo-tRNA, umożliwiającego wydłużanie łańcucha polipeptydowego.

nianie różnych strategii życiowych, w tym takich, które potencjalnie mogły występować u bardzo starych form. Wykazali między innymi, że bakterie ze „wskrzeszonymi” czynnikami elongacyjnymi, przypominającymi te sprzed 2,0 mld lat, mogły żyć w środowiskach o temperaturze 65°C (Benner i in. 2006).

Fakt, że czynniki elongacyjne i ich funkcje mogą być odtwarzane podczas dzisiejszej biosyntezy protein, implikuje, iż synteza tych makromolekuł, poprzedzona translacją, występowała już u najwcześniejszych eubakterii. Danych molekularno-biologicznych wynikających z zapisu w genomie można zatem użyć do potwierdzania geologicznych i paleontologicznych przypuszczeń o pierwotności RNA (Doolittle i in. 1996a, b; Gogarten i in. 1996; Hasegawa, Fitch 1996; Feng i in. 1997). Owi autorzy zgodnie popierają też hipotezę, że życie na Ziemi, „korzystające” z DNA, RNA i białek, z pewnością było obecne 2,0 mld lat temu, a być może istniało już 3,5 mld lat temu. Uważają również, że pierwsze eukarionty, które pojawiły się około 2,0 mld lat temu, były wprawdzie pozbawione kołowego genomu organizmów prokariotycznych, ale miały linearne genomy przypominające wczesne struktury i funkcje replikującego RNA. Benner ze współpracownikami (1989, 1993) oraz Koonin (2003) wnioskuje nawet, że testując możliwe sekwencje nukleotydów i ekstrapolując wstecz zmiany w części genomu odpowiedzialnej za czynniki elongacyjne, będzie można natrafić na moment metabolicznej złożoności „świata RNA”.

Wspomniane techniki selekcji *in vitro* polegają natomiast na manipulowaniu cząsteczkami budulcowymi tak, by utworzyć nową cząsteczkę z określoną katalityczną własnością⁵⁵. W tych metodach sztucznego rozwoju RNA (albo innego polimeru przenoszącego informacje), zachodzącego w obecności nukleotydów, otrzymywane są różne genetyczne odmiany (mutacje), z których wybiera się najlepiej wykonujące określony proces (selekcja). Następnie cząsteczki z wybranymi katalitycznymi zdolnościami są izolowane przez selekcję *in vitro* i rozbudowywane na kolejnych etapach eksperymentu⁵⁶. W przypadku populacji cząsteczek RNA zmiany szybko uwidaczniają się, ponieważ genotyp (podstawowe następstwo nukleoty-

⁵⁵ W praktyce metody selekcji *in vitro* wykorzystywane są do modyfikacji katalitycznych mechanizmów istniejących rybozymów. Cząsteczki RNA, które wiążą określone ligandy, mogą mieć zastosowanie w leczeniu chorób, w tym genetycznych, lub w diagnostyce. Syntetycznie zmodyfikowane rybozomy potrafią bowiem niszczyć infekcyjne wirusowe albo bakteryjne komponenty.

⁵⁶ Zaawansowane, molekularne techniki selekcji *in vitro*, szczególnie z katalitycznym RNAs, pokazują, że na poziomie molekularnym cząsteczki budulcowe i makromolekuły naśladują takie ewolucyjne wzory, jakie zachodzą w wolno żyjących organizmach. Ewolucja, jaką wyobrażał sobie Darwin nieco ponad 150 lat temu, zachodzi zatem nie tylko w makroskali – przeżywalność najlepiej przystosowanych form można obserwować także w probówce.

dów) ma bezpośredni i natychmiastowy skutek w fenotypie (np. określone, katalityczne działanie). Można więc w łatwy sposób uzyskać najróżniejsze projekcje łańcuchów przypominających RNA.

Choć jeszcze trudno sprawdzić wszystkie kombinacje nukleotydów, nawet w krótkich łańcuchach, przeprowadzając eksperymenty w warunkach naśladujących środowiska pierwotnej Ziemi, to możliwe wydaje się uzyskanie oligonukleotydów potencjalnie występujących w „świecie RNA”. Bartel i Szostak (1993), którzy z sukcesem wyselekcjonowali z puli 10^{15} różnych wariantów nowe rybozymy, zbudowane z 300 nukleotydów składających się na RNAs, twierdzą, że niektóre z tych rybozymów katalizowały reakcje przyłączania substratów (liganty) oligorybonukleotydowych do ich własnego końca, w sposób przypominający współczesne wydłużenie łańcucha podczas polimeryzacji RNA. Oszacowali przy tym, że tempo procesów katalitycznych z wyselekcjonowanymi rybozymami przebiegało 7 mln razy szybciej niż w reakcjach niekatalizowanych. Nie dorównuje ono tempu, z jakim współczesna polimeraza RNA przeprowadza swoje reakcje (ok. 10^{12} razy szybciej). Wiedząc jednak, że obecnie nie jest jeszcze możliwe przetestowanie *in vitro* wszystkich kombinacji nukleotydów, uzyskiwane wyniki są więc obiecujące. Pokazują ponadto, że perspektywa tworzenia prostych systemów nukleotydowych nie tylko okazuje się ogromna, ale przede wszystkim możliwa. Istnienie „świata RNA” powoli staje się więc faktem. Zagadkowe przestaje też być jego późniejsze zastąpienie znanym nam światem DNA–RNA–białko, w którym DNA przejęło funkcję przechowywania informacji genetycznej, a białka stały się głównymi katalizatorami reakcji chemicznych.

Ewolucyjne korzyści używania DNA jako genetycznego materiału badali Leu i in. (2011). Autorzy ci wykazali, że podatność na mutacje RNA jest większa niż DNA. Niewielki stopień degradacji informacji genetycznej podczas mutacji RNA występuje tylko w przypadku krótkich łańcuchów tego kwasu. Z faktu tego wynika, że liczba informacji, jaka może być przechowana w takim genomie jest ograniczona. Zjawisko to nie dotyczy DNA. Wspomniani autorzy, w doświadczałnej nieenzymatycznej polimeryzacji, porównali częstość wprowadzania błędnych nukleotydów (ang. *misincorporation*) w RNA i DNA oraz obliczyli najniższe możliwe liczby błędów w zależności od termodynamiki modelu. W swoich eksperymentach wykazali, że skłonność do występowania błędów w replikacji RNA była znacznie większa niż w replikacji DNA. Sugeruje to, że całkowita informacja zawarta w genomie mogłaby wzrosnąć dopiero po pojawieniu się DNA. Z analizy mieszaniny przejściowych dupleksów – hybryd RNA/DNA – wynika ponadto, że kopiowanie RNA na DNA przebiega z większą wiernością niż kopiowanie DNA na RNA. Oznacza to, że wyprowadzanie „świata RNA” od ewentualnego „świata DNA” jest mało prawdopodobne, bowiem próby

takie zawsze kończyłyby się znaczną stratą informacji. Późniejsze przejęcie pewnych funkcji przez DNA wynika zatem z jego większej chemicznej stałości i możliwości powiększania genomu z zachowaniem informacji podczas takiego genetycznego przejścia. Z faktów tych wynika, że zapoczątkowany proces przemian (kierunek ewolucji) stał się nieodwracalny.

Dziś jest niemal pewne, że w archaicznym świecie przedkomórkowych organizmów dominacja układów opartych na RNA nad układami z DNA dodatkowo wymuszana była przez ówczesne środowisko. Przypowierzchniowe wody w pierwotnym oceanie charakteryzowały się zakwaszeniem przez CO₂ z atmosfery, a RNA, w przeciwieństwie do DNA, jest bardziej trwały przy niższych wartościach pH. DNA wykazuje natomiast większą trwałość przy pH 5,0–11,0 – poza tymi granicami podwójna spirala rozwija się⁵⁷.

Podsumowując, kwas rybonukleinowy jest najbardziej uniwersalny spośród wszystkich związków organicznych występujących we współczesnych organizmach żywych. Zawiera on bowiem informację genetyczną i zarazem wykazuje zdolność do pełnienia funkcji enzymu, który tę informację mógłby kopiować, a więc rozmnażać się. Inni kandydaci na „żywe” związki nie mają takich właściwości – DNA samo się nie powieli, białka zaś pozostają bardzo wrażliwe na wszelkie zmiany swej struktury. Tymczasem przypadkowe mutacje, dzięki którym organizm może ewoluować, okazują się dla istoty żywej wręcz niezbędne! Wreszcie RNA, jak na cząsteczkę o tak dużej sprawności, prezentuje wyjątkowo prosty typ budowy, zdecydowanie prostszy od swojego konkurenta – DNA. Dlatego naukowcy wciąż próbują odtworzyć hipotetyczny „świat RNA” w laboratoriach. Chcą tym samym wykreować samopowielający się, ewoluujący organizm zbudowany wyłącznie z RNA.

Niestety, główna trudność koncepcji „świata RNA” pojawia się już w początkowym jego stadium. Odpowiedzi wciąż wymaga pytanie: Jak powstała pierwsza replikaza RNA? Najdosadniej udzielił jej Christian de Duve (1988), odpowiadając również pytaniem „Did God make RNA?” („Czy Bóg stworzył RNA?”).

Eksperymentalnie potwierdzona aktywność katalityczna odnosi się bowiem tylko do wysoce skomplikowanych cząsteczek obecnie istniejącego RNA. Zdaniem Orgela (1992), mimo wielu prób jeszcze nikomu nie udało się otrzymać repliki wyjściowego polimeru RNA bez udziału białek. Bariera nie do pokonania wydaje się też synteza nukleozydów pirymidynowych, której uczeni nie potrafią przeprowadzić bez udziału enzymów. Możliwa jest jedynie modyfikacja naturalnie występujących rybozymów. Jako pierwsi

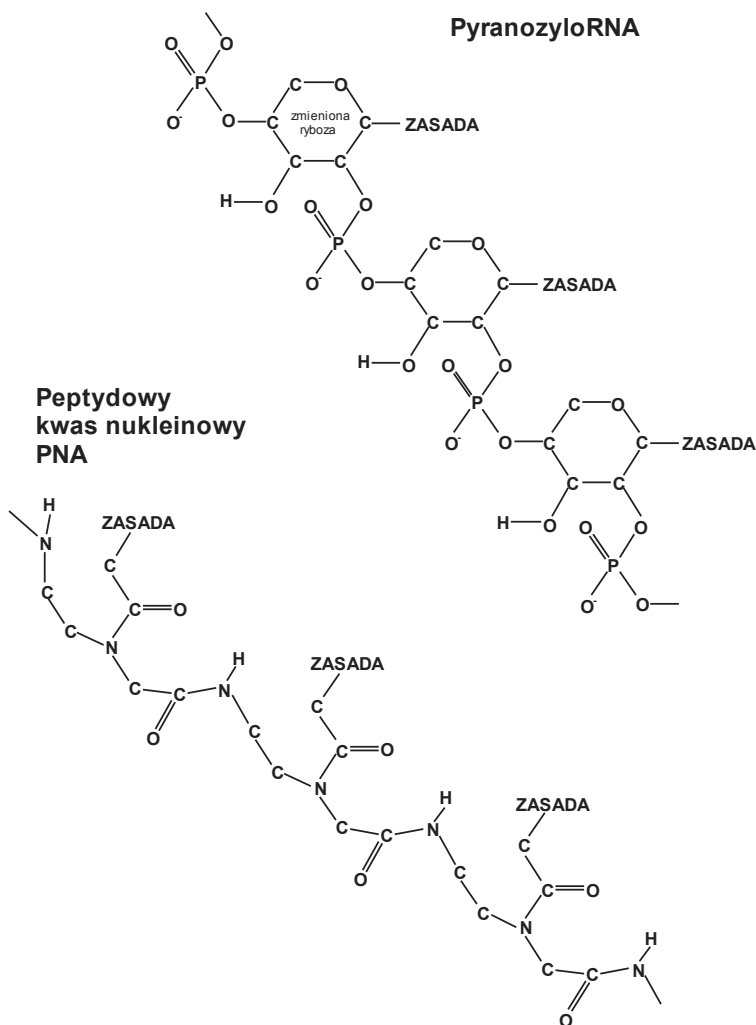
⁵⁷ Na DNA działa hydroliza kwaśna, a w pH 3,0 powstaje pochodna DNA, bez zasad purynowych. RNA ulega hydrolizie pod wpływem zasad; traktując RNA NaOH, otrzymuje się nukleozydy.

dowiedli tego Cech (1987) i Szostak (1988). W początkach lat 90. Szostak w jednej z serii doświadczeń otrzymał nawet purynowe nukleozydy, czyli cząsteczki składające się z zasady purynowej i rybozy, jednakże bez reszty fosforanowej, koniecznej do stworzenia nukleotydu. W innych doświadczeniach udawało mu się połączyć nukleotydy w „warunkach pierwotnej Ziemi”. Niestety, wszystkie te próby, mimo że uwzględniały obecność współczesnych rybozymów, przynosiły mierne rezultaty – zsyntetyzowane oligonukleotydy RNA były nietrwałe.

Duże nadzieje na zainicjowanie w warunkach laboratoryjnych samoorganizacji i replikacji RNA budziły doświadczenia Gözen Ertema i James Ferrisa. Autorzy ci, w roku 1996, przedstawili możliwość syntezy RNA i jego replikacji bez udziału białek. Syntetyzowali oni oligonukleotydy i mieszały je z wolnymi nukleotydami. Nukleotydy układały się wzdłuż oligonukleotydów (zgodnie z zasadą Watsona–Cricka) i łączyły się z sobą, tworząc nowe oligonukleotydy. Uzyskanie takich komplementarnych łańcuchów na oryginalnej matrycy oligomerów stanowiłoby pierwszy etap prebiotycznej replikacji RNA. Następnie łańcuchy te rozdzielałyby się, a komplementarne nici tworzyłyby matryce do syntezy łańcuchów komplementarnych do nich, na zasadzie wzajemnego przyciągania się A i U oraz G i C. Jednakże po latach prób nie zdołano osiągnąć drugiego etapu replikacji.

Skoro tak trudno replikować RNA i syntetyzować wszystkie nukleotydy, chemicy dopuszczają myśl, że to jednak nie RNA było pierwszą samoreplikującą się cząsteczką i że wcześniej pojawił się jeszcze prostszy system replikacyjny. Zgodnie z tym poglądem, RNA byłby „tworem Frankensteina”, który w końcu wyeliminował swojego stwórcę, a do czasów współczesnych został zastąpiony przez obecny sposób replikacji organizmów, czyli DNA.

Oczywiście nie sposób udowodnić tego poglądu za pomocą wykopalisk. Tak proste organizmy nie pozostawiły po sobie żadnych śladów. Niemniej warto tu przytoczyć sugerowane modele replikatorów o różnej strukturze, w tym składające się z elementów chemii organicznej, takich jak współcześnie rozumiane białka, kwasy nukleinowe, ale też i takich, jak krysztale (Dawkins 1996), a nawet systemy kwantowe (Davies 2005). Warto przytoczyć przykład zsyntetyzowanej przez Eschenmosera (1997) cząsteczki o nazwie pyranozyloRNA (pRNA; ryc. 13), blisko spokrewnionej z RNA, jednak zawierającej inną wersję rybozy (z sześcioczłonowym pierścieniem). Cząsteczka ta charakteryzuje się tym, że może tworzyć komplementarną nić pRNA w wyniku standardowego parowania Watsona–Cricka, a łańcuchy nie oplatają się wokół siebie (Eschenmoser 1997). Jest to więc cecha istotna, ponieważ w świecie pozbawionym białkowymi enzymami oplatanie jedynie hamowałoby proces rozdzielania łańcuchów, konieczny podczas przygotowań do replikacji.



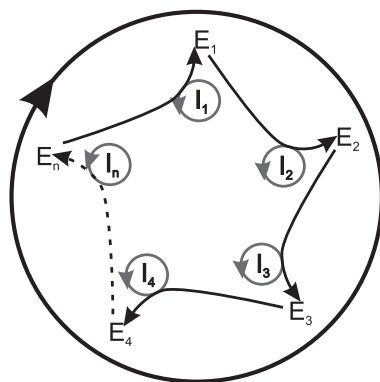
Ryc. 13. Schematy pyranosyloRNA (wg Eschenmosera 1997) i peptydowego kwasu nukleinowego PNA (Nielsen 1993)

Jeszcze prostszą cząsteczkę zaproponował Peter Nielsen (1993). Niestety w tym przypadku problem polega na tym, że komputerowo zaprojektowany polimer peptydowy kwasu nukleinowego (PNA; ryc. 13) choć zachowuje się jak typowy RNA, to jak na razie „czyni” to tylko na monitorze komputera.

Po mało perspektywicznych próbach stworzenia polimeru informacyjnego alternatywnego do RNA odżył dziś nieco zapomniany model wykazujący cechę „życia”, autorstwa Tibora Gantiego, węgierskiego badacza, zaproponowany w 1971 r. (Szathmari, Griesemer 2003). Niezwykłym osiągnięciem

nięciem tego autora okazało się przedstawienie schematu minimalnego układu, który żyje, w którym wszystkie składniki są niezbędne, aby ta cecha pojawiła się, a odcięcie choć jednego z nich powoduje jej zanik. Tę podstawową, najmniejszą jednostkę życia Ganti nazwał chemotonem. Nie musiała ona w rzeczywistości istnieć, ale w stworzonym modelu spełnia wszystkie zadane kryteria życia. Stanowi niepodzielną, stabilną całość, prowadzi prosty metabolizm, a występujące w dużych ilościach cząsteczki, łącząc się w polimery, kontrolują reakcje zachodzące w systemie. Chemoton dostarcza zatem dowodów dla hipotezy początkowego RNA, bez potrzeby białkowych enzymów. Możliwe zatem, iż po powstaniu błon lipidowych rozwinęła się chemosynteza, ewolucyjnie starszy od fotosyntezy sposób wytwarzania prostych związków organicznych z CO_2 za pomocą energii z utleniania siarkowodoru (H_2S), wodoru czy innych związków nieorganicznych lub organicznych, bez udziału światła słonecznego. Przed pojawieniem się struktur błoniastych chemosynteza nie mogła powstać, ponieważ wymaga ona skomplikowanego zestawu enzymów, a te z największą wydajnością działają w wyizolowanych środowiskach.

Model podobny w swej prostocie do chemotonu zaproponował, również w 1971 r., Manfred Eigen (ryc. 14). Według tego badacza cząsteczki pierwotnych kwasów nukleinowych, różniące się między sobą stopniem stabilności, szybkością i dokładnością kopiowania oraz długością życia, podlegając działaniu doboru naturalnego, utworzyły system kwas nukleinowy-białko. Takie hipotetyczne układy, złożone z wpływających na siebie kwasów nukleinowych i białek, które sprzyjają powielaniu się pierwotnych biopolime-



Ryc. 14. Uproszczony schemat hipercyklu

I_n – matryce RNA, E_n – replikazy; w zaproponowanym modelu mamy wiele RNA, gdzie n RNA koduje n enzym ($n = 1, 2, \dots$). Enzymy cyklicznie zwiększają tempo różnicowania i wydłużania łańcuchów RNA. Pierwszy enzym przyspiesza tempo syntezy drugiego RNA, drugi enzym przyspiesza tempo syntezy trzeciego RNA, ..., n -ty enzym przyspiesza tempo syntezy pierwszego RNA

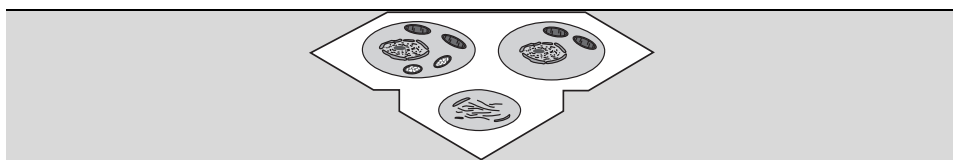
rów, stanowiących najprostszy system genetyczny w prebiotycznym środowisku, Eigen ujął w matematyczny model „żyjących” cykli i hipercykli. Zgodnie z tymi schematami na wczesnym etapie biogenezy wyodrębniły się grupy prostych białek, pełniących funkcje katalityczne, i odcinki kwasów nukleinowych, kodujących informację o budowie białek. Ich ulepszanie odbywało się we wzajemnie powiązanych cyklach. W ten sposób oprócz prostych cykli obejmujących jedną reakcję chemiczną powstały hipercykle wzajemnie powiązanych reakcji. Fundamentalną jednostką tego systemu cykli wzajemnie powiązanych w hipercyklu, nazwanego przez Eigena kwazigatunkiem, był RNA zbudowany z przynajmniej stu nukleotydów, a więc podobnie jak dzisiejsze cząsteczki tRNA. Współdziałające z nimi polipeptydy, w tym enzymy, podlegały mutacjom i selekcji przez środowisko, a więc ewolucji.

System przedstawiony na rycinie 14 pokazuje, jak z rozwojem informacji wprowadzanej do pamięci RNA ulepszaniu podlegają tworzone z niego kolejne enzymy, analogicznie do zwykłych procesów translacji w biologicznych układach. Eigen uważa, że dla efektywnej konkurencji, to jest dla przeżywania hipercykli z największym tempem reakcji i maksymalną dokładnością, różne hipercykle powinny zostać umieszczone w odizolowanych przestrzeniach, na przykład w koacerwatach. W 1979 r. Eigen z Peterem Schusterem rozważali hipercykle jako protokomórki, a więc pierwotne, jednokomórkowe struktury biologiczne przejawiające cechy organizmów żywych.

Zatem nie tylko w laboratoriach niemal całego świata, ale i w pracowniach komputerowych wielokrotnie już sprawdzano zagadkowe próby przejścia od prostych substancji organicznych czy nawet makromolekuł do stanu materii zwanym „życiem”. Współczesna nauka zdaje się obecnie być jednomyślna jedynie odnośnie pierwotnych biomolekuł. Tu uwaga koncentruje się wokół przypuszczenia, że milowym krokiem na drodze do powstania życia stało się pojawienie RNA, cząsteczki mniejszej i prościej zbudowanej od DNA. Jednak przedstawione modele, choć opracowane z wykorzystaniem różnych wiarygodnych założeń, nie mogą w oczywisty sposób wyjaśnić rzeczywistego procesu początku życia, gdyż nadal brakuje im silnych empirycznych dowodów. Mimo to kwazigatunki, chemotony czy hipercykle dostarczają dobrze zdefiniowanego matematycznego tła dla zrozumienia początków genetycznego rozwoju systemów. Na ich podstawie możliwe jest nie tylko dalsze rozwijanie cybernetycznych systemów, ale w zestawieniu z biochemicznymi danymi mogą być one podstawą dla eksperymentów laboratoryjnych nad kolejnymi, bardziej skomplikowanymi modelami.

Niestety, wszystko wskazuje jednak na to, że natura pierwszej, samoreplikującej się cząsteczki nieprędko pozwoli się poznać, o ile to w ogóle nastąpi. Ten pesymizm poznawczy wynika z faktu, że obecnie nie istnieje me-

toda badawcza pozwalająca na ustalenie, która z proponowanych cząsteczek mogłaby odpowiadać prawdzie – o ile którakolwiek z sugerowanych jest w ogóle jej bliska. Wydaje się, że nigdy nie udowodnimy istnienia ani „świata RNA”, ani tego sprzed RNA, ponieważ podróże w czasie są niewykonalne. Niemniej warto badać właściwości tego kwasu, chociażby dlatego, by sprawdzić, czy pasują one do naszych modeli powstania życia na Ziemi.



ŻYCIOWE STRATEGIE ORGANIZMÓW ŻYWYCH

Jednym z fenomenów życia są tysiące reakcji zachodzących stale i jednocześnie w każdej żywej komórce. Co więcej, ku zdumieniu badaczy i zaszczytu konstruktorów, w zdecydowanej większości odbywa się to... w temperaturze pokojowej i pod normalnym ciśnieniem, a przecież wiadomo, że niewiele procesów przemysłowych udaje się prowadzić w takich warunkach. Większość procesów technologicznych wymaga wyszukanych komponentów i dużych nakładów energii, podczas gdy komórka, ta mikroskopijna żywa fabryka, dokonuje wszystkich skomplikowanych przemian potrzebnych do jej istnienia w łagodnych, optymalnych dla życia okolicznościach. Co więcej, udaje jej się to, gdy wykorzystuje jedynie CHON i ogólnie dostępną energię słoneczną lub jej pochodną zmagazynowaną w wiązaniach chemicznych. Zadziwiającym, jeśli nie wręcz genialnym, jest też fakt, że przy tak minimalnych wymaganiach możemy dzisiaj zachwycać się ogromnym bogactwem ożywionego świata. Jego różnorodność to około 2 mln opisanych, żyjących gatunków i jeszcze większa liczba tych, które pozostawiły informacje o sobie w postaci skamieniałości. Ten oszałamiający przejaw życia nie zaistniałby jednak, gdyby z organizacją komórki nie wytworzyły się sposoby zdobywania energii, pozwalające przeciwdziałać nieprzychylnemu środowisku i wewnętrznej entropii⁵⁸, z równoczesnym wytwarzaniem i rozkładaniem składników pokarmowych, magazynując nadwyżki energii w wiązaniach chemicznych łączących atomy jedynie czterech pierwiastków: C, H, O, N.

⁵⁸ Komórka, będąca skomplikowanym układem termodynamicznie otwartym, aby utrzymać skutecznie wysoki stan uporządkowania, musi dysponować energią.

Doszliśmy zatem do drugiej, obok powstania komórek, największej zagadki narodzin życia, mianowicie do powstania szlaków metabolicznych. W prapoczątkach życia, w warunkach, w których dzisiaj niewiele organizmów by przetrwało, ukształtowane życie musiało jedynie „nauczyć się” rozkładać (katabolizm) materię organiczną. W pierwotnym oceanie, w sąsiedztwie protokomórek, występowały pod dostatkiem spontanicznie utworzone związki organiczne. Pierwsze organizmy na Ziemi charakteryzowały się zatem cudzożywym trybem życia (heterotrofia), a być może i drapieżnością. Nie wyklucza się, że przejawiały one pewną „agresję” względem innych kwazigatunków.

Dopiero z czasem, w miarę jak kurczyły się zapasy pożywienia w „pierwotnym bulionie”, organizmy prawdopodobnie opracowały alternatywną strategię pozyskiwania energii. Zamiast polegać na resztkach dostępnych cząsteczek materii o dużej energii, zaczęły syntetyzować złożone związki organiczne z prostszych (anabolizm). Przewagę w doborze naturalnym zyskiwały te organizmy, które zaspokajały swoje zapotrzebowanie na CHON, samodzielnie syntetyzując potrzebne biomolekuły. Produktów syntezy musi być bardzo dużo, stanowią one bowiem główny budulec organizmów żywych, a w dużych ilościach są niestabilne⁵⁹. Chcąc utrzymać stan równowagi, pierwotne komórki musiały równoważyć rozpad ciągłą syntezą, a więc i nieprzerwaną dostawą energii. Niektóre komórki zaczęły korzystać z nieograniczonego źródła energii, jakim jest światło słoneczne, wytwarzając potrzebne substancje organiczne z najprostszych i zarazem najobficiej występujących związków – CO₂ i H₂O. Prawdopodobnie mechanizm podobny do współczesnej fotosyntezy powstał około 3,0 mld lat temu (De Marais 2000), czyli około 6 maja według naszego kalendarza. Energia słoneczna stała się w ten sposób przydatna nie tylko dla organizmów samożywnych, lecz również dla cudzożywnych, wykorzystujących te pierwsze jako pożywienie. Powstałe w procesie fotosyntezy produkty reakcji zawierają więcej energii niż jej suma w substratach. Ponadto, tlen jako produkt uboczny fotosyntezy spowodował zmianę charakteru atmosfery z redukującej na utleniającą. Eksplozywny rozwój producentów, którzy zamiast relatywnie rzadkich źródeł minerałów potrzebowali teraz jedynie wszechobecnych: – wody, światła i dwutlenku węgla, spowodował rozpowszechnienie się oddychających tlenowo organizmów heterotroficznych.

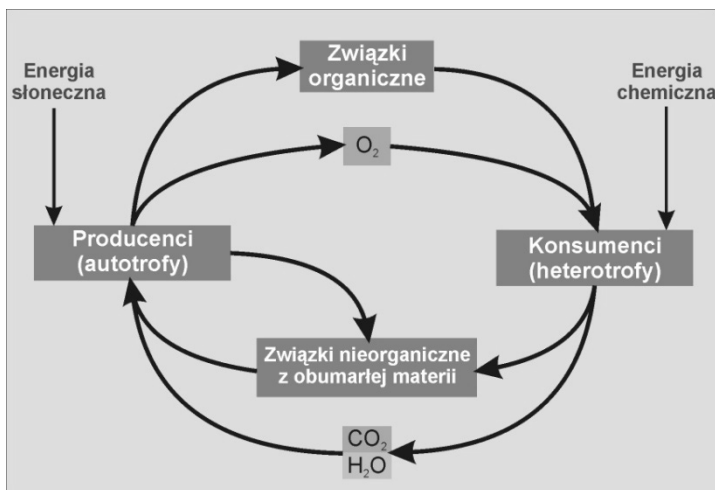
Patrząc z perspektywy na świat organiczny, utrzymanie stanu zwanego życiem nie wydaje się więc skomplikowane. W najbardziej ogólnym zarysie

⁵⁹ W stanie równowagi chemicznej makromolekuł w stosunku do swoich monomerów jest niezmiernie mało. Chcąc utrzymać dużą liczbę makromolekuł, musimy dostarczać energię i monomery. Czynimy to sami podczas każdego posiłku i nietrudno sobie wyobrazić, co się stanie, gdy przestaniemy jeść.

sprowadzić go można do cyklu wzajemnego „odżywiania się sobą” (syntrofia), w którym pierwotną produkcję biomasy oraz tlen służący większości organizmów do oddychania zapewnia fotosynteza, stając się tym samym procesem warunkującym życie na Ziemi.

Z ryciny 15 wynika, że aby realizować potrzeby zdobywania materii i energii, znany nam świat organiczny stosuje zaledwie dwie strategie – autotrofię i heterotrofię. Autotrofy (organizmy samożywne, głównie rośliny) wytwarzają potrzebne im składniki pokarmowe z tak prostych prekursorów, jak: CO_2 , H_2O , NH_3 , N_2 (a więc CHON). Wykorzystują one do tego zewnętrzne źródła energii, a następnie je konsumują, uzyskując energię, którą magazynują w wysokoenergetycznych związkach chemicznych. Komórki autotroficzne są więc względnie samowystarczalne, podczas gdy heterotrofy (organizmy cudzożywne: zwierzęta, grzyby, pierwotniaki, drobnoustroje) korzystają z gotowego pokarmu, wytworzonego przez inne komórki, muszą go jedynie rozłożyć. Gotowe CHON pobierają z pokarmem. Energia uwolniona podczas rozkładu tegoż pokarmu wykorzystywana jest do syntezy własnych biomolekuł, a jej nadwyżki są magazynowane, podobnie jak u autotrofów, w wiązaniach chemicznych wysokoenergetycznych związków organicznych.

Inną podstawę, na której można utworzyć klasyfikację komórek, stanowią ich źródła energii. Tu również mamy jedynie dwie wersje każdej ze strategii – chemotrofy i fototrofy. Pierwsze uzyskują energię z utleniania związków chemicznych, z reakcji oksydoredukcyjnych, drugie z promieniowania słonecznego (ryc. 16, tab. 8). Dalszy podział chemotrofów i fototrofów



Ryc. 15. Syntrofia – doskonały recykling

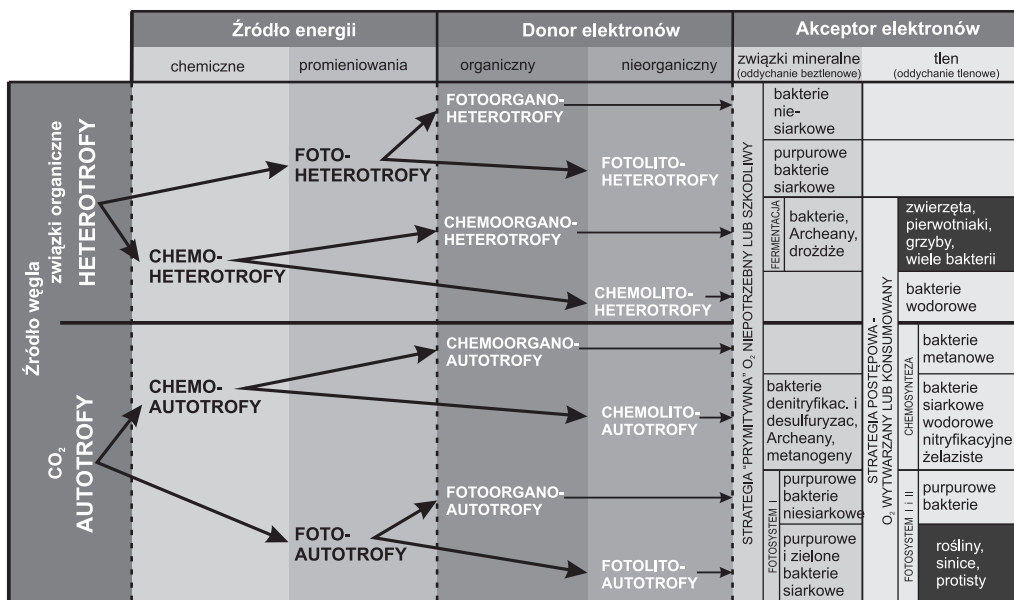
Tabela 8. „Prymitywne” i rozwinięte sposoby zdobywania energii (wg Schopfa 2002)

Źródło CHON	Źródło energii	Przykłady
Rozwinięte – O ₂ wytwarzany lub konsumowany		
Składniki pokarmowe wytworzone przez autotrofy	oddychanie tlenowe O ₂ + glukoza → 36 jednostek energetycznych (j.e.)	prokarioty, protisty, grzyby, zwierzęta
Fotosynteza oksygenowa CO ₂ + H ₂ O → glukoza	oddychanie tlenowe O ₂ + glukoza → 36 j.e.	sinice, protisty, rośliny
CO ₂ + H ₂ S CO ₂ + (CH ₂ O) _n	O ₂ + H ₂ S O ₂ + CH ₄	BAKTERIE
„Prymitywne” – tlen niepotrzebny		
Fotosynteza anoksygenowa CO ₂ + H ₂ S → glukoza	glikoliza glukoza → 2 j.e.	bakterie fotosyntetyzujące
Składniki pokarmowe wytwarzane przez autotrofy lub spontanicznie powstałe w pierwotnym oceanie	glikoliza glukoza → 2 j.e.	bakterie i grzyby fermentujące

uwzględnia dobór substratów (rodzaj donorów elektronów) w celu zdobycia energii. Strategie metaboliczne organizmów można więc podzielić na kolejne dwie grupy. Gdy pobierane są substraty organiczne, nazywa się je organotroficznymi, gdy mineralne – litotroficznymi.

Wśród istot zamieszkujących Ziemię występują wszystkie z możliwych kombinacji tych szlaków metabolicznych. Największe znaczenie mają jednak: fotolitoautotrofy (rośliny zielone i sinice), chemolitoautotrofy (liczne bakterie) oraz chemoorganoheterotrofy (zwierzęta, grzyby, bakterie). Ze względu na akceptor elektronów spośród nich wyróżnia się tlenowe (aeroby), wykorzystujące tlen cząsteczkowy jako ostateczny akceptor elektronów pochodzących z organicznych donorów, i beztlenowe (anaeroby), pobierające zamiast tlenu inne cząsteczki jako akceptory elektronów.

Wszystkim organizmom potrzebne są zatem trzy rodzaje substratów (ryc. 16). Po pierwsze substrat strukturalny. Jest nim materiał do budowy własnego ciała, przede wszystkim węgiel (C), którego źródłem mogą być zredukowane związki organiczne lub CO₂ wymagający kosztownej energetycznie redukcji. Po drugie reduktor, czyli donor elektronów (H⁺), który utleniając się, dostarcza energii albo umożliwia zredukowanie utlenionego substratu strukturalnego (CO₂) w celu wytworzenia związków organicznych (mogą nim być różne cząsteczki organiczne (CH₂O)_n albo mineralne: wodór, amoniak, siarkowodór, woda i in.). Po trzecie utleniacz, czyli akceptor elektronów (O₂), który w reakcji z substratem energetycznym uwolni w procesie



Ryc. 16. Znane strategie życia

oddychania energię potrzebną do wykonania pracy. Znane są trzy typy utleniaczy: tlen w oddychaniu tlenowym, różne związki mineralne, na przykład azotan, siarczan oraz związki węgla w oddychaniu beztlenowym. Ważne jest to, że nie wszystkie komórki danego organizmu mają cechy jednej klasy. Dla niektórych organizmów, oprócz utlenienia substratów, źródłem energii może być również promieniowanie słoneczne. Tak jest u roślin wyższych – komórki (np. liści) zawierające chlorofil to fotosyntetyzujące autotrofy, podczas gdy komórki korzeni są heterotroficzne. Co więcej, większość komórek zawierających chlorofil działa jako autotrofy tylko przy świetle, natomiast w ciemności stają się heterotrofami.

Mając na uwadze te możliwości pozyskiwania materii i energii przez organizmy żywe, trzeba zapytać, jaką strategię w tym względzie obrały pierwsze formy życia na Ziemi. Niestety jednoznaczna odpowiedź i w tym przypadku okazuje się prawie niemożliwa. Niemniej jednak wydaje się, że drogą eliminacji możemy ujawnić pewne możliwe formy procesów metabolicznych w archaiku.

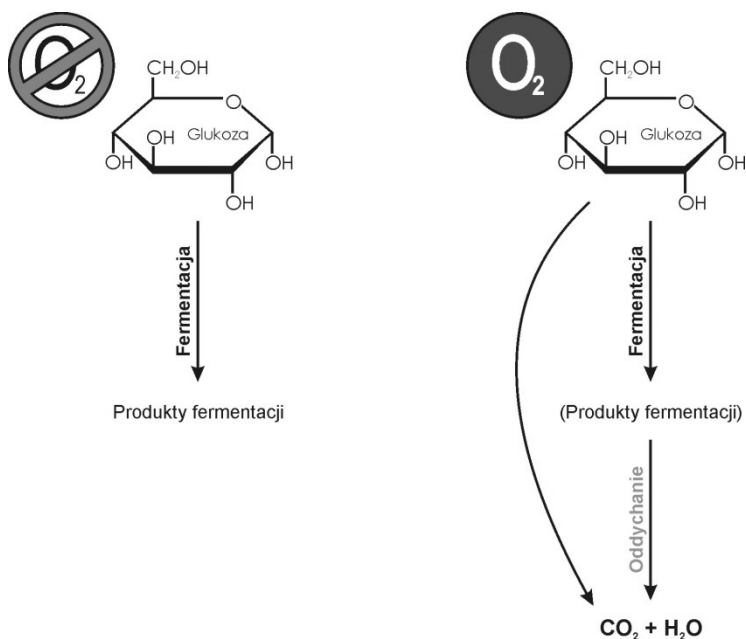
Bez wątpienia pierwsze organizmy nie mogły prowadzić złożonego metabolizmu autotrofów. Polega on bowiem na konwersji energii świetlnej na chemiczną oraz fotolizie wody, prowadzącej do wytworzenia siły asymilacyjnej (ATP, NADPH + H⁺). U roślin spotęgowany jest on skomplikowanymi

barwnikami fotosyntetycznie czynnymi i zwielokrotniony fazami: jasną (zależną od światła) oraz ciemną (niezależną bezpośrednio od światła). Można więc wykluczyć jego obecność u LUCA. Mniej skomplikowany metabolizm przeprowadzają heterotrofy. Ale i tu, ze względu na beztlenową, redukującą atmosferę, powinniśmy wyeliminować oddychanie tlenowe. Fotosynteza i oddychanie charakteryzują się ponadto tym, że w większości organizmów procesy te dokonują się w otoczonych błoną organellach, to jest odpowiednio w chloroplastach i mitochondriach, które zawierają odrębne formy DNA, zdolne do autoreplikacji, różne od DNA jądra komórek, w których występują. Oparin wiedząc o tym, w swojej koncepcji zasugerował, że pierwsze organizmy na Ziemi musiały być cudzożywne i beztlenowe, a więc fizjologicznie prostsze od najprostszych roślin i zwierząt. W rachubę wchodziłaby zatem jakaś kombinacja oddychania beztlenowego (fermentacja) i chemosyntezy. I choć obie te strategie cieszą się obecnie uznaniem, wydaje się, że właściwa jeszcze dziś wielu organizmom fermentacja stanowiła główne źródło energii dla LUCA. Wobec braku alternatywy takie właśnie podejście narzuca nam jeszcze sama logika życia. W sytuacji, kiedy pierwotne oceany obfitowały w najróżniejsze związki organiczne, nie było potrzeby istnienia skomplikowanych szlaków metabolicznych. Proces przyswajania owych związków cechowała niska wydajność energetyczna, jednak uzyskiwana energia w zupełności wystarczała, ponieważ poziom komplikacji „komórki” był niewielki. Chemoautotrofia z pewnością powstała później, gdyż w procesie przemian chemicznych wymaga wspomnianych struktur błoniastych i obecności wolnego tlenu.

Oddychanie – strategia wydajna, ale nie suwerenna

Ten podstawowy proces o charakterze fizjologicznym zachodzi obecnie we wszystkich żywych komórkach, zarówno roślinnych (fotooddychanie⁶⁰), jak i zwierzęcych. Najczęściej kojarzy nam się z pobieraniem tlenu i wydzielaniem dwutlenku węgla. Jednakże może on zachodzić również bez udziału tlenu. W zależności od tego, z jakiej strategii życiowej korzystają organizmy, podzielić je można na prymitywne, przeprowadzające fermentację, a więc takie, u których końcowym akceptorem elektronów (utleniaczem) jest jakaś cząsteczka organiczna, i postępowe, wytwarzające lub konsumujące tlen (oddychanie tlenowe lub komórkowe; ryc. 17).

⁶⁰ Zielone komórki roślin oprócz chloroplastów zawierają również mitochondria, które w ciemności przejawiają oddychanie mitochondrialne z wykorzystaniem substratów wytworzonych podczas fotosyntezy.



Ryc. 17. Wykorzystanie glukozy w beztlenowych i tlenowych procesach metabolicznych

Wśród organizmów, które mogą żyć w warunkach beztlenowych wyróżnia się dwie klasy. Pierwsza z nich to anaeroby bezwzględne. Żyją one w środowiskach pozbawionych tlenu lub zawierających go bardzo niewiele, na przykład w głębi gleby, w mulistych dnach oceanów lub w głębinach oceanicznych. Zalicza się do nich między innymi bakterie denitryfikujące lub metanowe. Druga klasa to anaeroby względne. Egzystujące w warunkach beztlenowych, uzyskują one energię z fermentacji glukozy, podobnie jak beztlenowce bezwzględne. Natomiast egzystując w środowisku zawierającym tlen, zazwyczaj przeprowadzają degradację swego „paliwa” na drodze beztlenowej, a produkty tego szlaku metabolicznego utleniają kosztem tlenu cząsteczkowego. Model ten jest charakterystyczny nie tylko dla wielu bakterii, drożdży i grzybów, lecz także dla aerobowych komórek większości zwierząt i roślin (tab. 8).

Fermentacja (oddychanie beztlenowe)

Fermentacja stanowi najstarszy i jednocześnie najprostszy pod względem chemicznym i biologicznym proces wytwarzający energię. Uzyskuje się ją najczęściej podczas rozszczepiania cząsteczki cukru zwanej glukozą

($C_6H_{12}O_6$) na dwie cząsteczki produktu zwanego kwasem pirogronowym. Proces ten odbywa się w wodnym środowisku cytoplazmy komórek. Nie wymaga więc obecności błon czy organelli jak systemy powstałe później. Zachodzi ponadto w warunkach beztlenowych⁶¹, a więc w takich środowiskach, jakie dominowały u samego zarania życia.

W oddychaniu tym powstają tylko dwie cząsteczki ATP ($C_6H_{12}O_6 + 2ADP + 2P_n \rightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2 + 2ATP + 2H_2O$), dostarczające więc dużo mniej energii niż w tlenowym, w którym powstaje ich aż 36 (w przeliczeniu na kcal jest to odpowiednio 47:686). Jednakże to ta archaiczna forma zdobywania energii przetrwała do dziś, często współtowarzysząc bardziej skomplikowanemu, działającemu przy tym z maksymalną wydajnością, oddychaniu tlenowemu⁶².

Można by zatem pokusić się o stwierdzenie, że ten szlak metaboliczny stanowił przygotowanie do dalszego utleniania produktów fermentacji z udziałem tlenu. Fermentacja miała więc dla życia fundamentalne znaczenie. Stanowiła bowiem podstawę egzystencji pierwszych organizmów, które energię uzyskiwały z rozpadu powszechnie dostępnej glukozy. Na pierwotnej Ziemi to uniwersalne „paliwo” występowało dość powszechnie, gdyż glukoza jest najbardziej trwałym i najbardziej odpornym na zmiany temperatury czy kwasowości spośród pozostałych sześciowęglowych cukrów.

Zgodnie ze scenariuszem Oparina i Millera, Ziemię musiały pierwotnie zasiedlać mikroorganizmy anaerobowe odżywiające się glukozą z „pierwotnego bulionu”, będącego źródłem CHO. Azot pobierały z amoniaku i azotanów oraz z atmosfery, natomiast energię z fermentacji. Jednak taka strategia cechowała się wyjątkowym marnotrawstwem energii. Produkty powstające podczas anaerobowej, fermentacji pozostawały w stanie wysokiego utlenienia. Zawierając większość energii pierwotnej, cząsteczki glukozy ulegały wydaleni, ponieważ nie mogły być dalej wykorzystywane. W porównaniu z komórkami aerobowymi, komórki żyjące w warunkach beztlenowych musiały więc zużywać dużo więcej glukozy, aby uzyskać równoważną ilość energii. Toteż z namnażaniem się tych prostych komórek zaczęło gwałtownie ubywać pokarmu glukozowego, a bez możliwości jego odtworzenia życia zagrażało wymarcie.

Zatem, po wykorzystaniu abiotycznie powstających związków organicznych, głównie glukozy, dylematem stał się jej niedobór. Znana nam już

⁶¹ Biorcą elektronów jest związek organiczny a nie tlen, jak w oddychaniu tlenowym.

⁶² Organizm ludzki też może przestawić swój metabolizm na beztlenowy. Dzieje się tak wtedy, gdy zapotrzebowanie na energię zbiega się z chwilowym brakiem tlenu. W komórkach mięśni oddychanie beztlenowe pojawia się przy zwiększonym wysiłku fizycznym, a jego produkt – kwas mlekowy – powoduje „zakwasy”.

z prostoty i ekonomii komórka po raz kolejny zadziwiła swoją konserwatywnością – odwróciła proces glikolizy i stworzyła szlak prowadzący do biosyntezy glukozy. Zachowanych zostało przy tym siedem z 11 faz enzymatycznych biorących udział w glikolizie, lecz przebiegających w przeciwnym kierunku. Cykl ten nie wymaga zatem tworzenia nowej grupy genów i enzymów do biosyntezy glukozy. Takie postępowanie nazywa się synergizmem. Znają je dobrze informatycy zajmujący się składaniem komputerów. Nie wymyślają oni nowych pamięci, kart czy dysków, ale – na podstawie tego co już stworzyli inni – budują nowe, sprawniejsze komputery, dobierając jedynie odpowiednie podzespoły.

Niestety, proces syntezy glukozy okazał się bardzo niewydajny, zużywał bowiem trzy razy więcej energii, niż można było uzyskać w procesie fermentacji. Mikroorganizmy prowadzące biosyntezę glukozy mogły zastosować to rozwiązanie jako chwilowe i nieperspektywiczne, gdyż w pewnym sensie „żyły na kredyt” i nie rokowały rozwinięcia najbardziej ekonomicznych strategii przetrwania. Dalsza ekspansja układów żywych zależała więc od znalezienia nowego źródła energii. Umożliwiły to „wynałazki” oddychania tlenowego i autotrofii. Trudno stwierdzić, który z nich pojawił się jako pierwszy, gdyż warunkiem koniecznym do zaistnienia obu tych form zdobywania energii okazała się obecność wolnego tlenu.

Krótką charakterystyka oddychania tlenowego, przedstawiona w następnym rozdziale, wynika nie tyle z chronologii wydarzeń, ile ze współczesnej klasyfikacji szlaków metabolicznych. Jest ono po prostu inną, rozbudowaną formą oddychania beztlenowego. Niemniej należy podkreślić, że beztlenowy rozkład glukozy stał się obowiązkowym, pierwszym etapem dla następującej po nim tlenowej fazy oddychania, szlak fermentacyjny zaś wspólnym zarówno dla tlenowych, jak i beztlenowych procesów zużywania glukozy.

Oddychanie tlenowe (komórkowe)

Podłoże dla oddychania tlenowego, właściwego zwierzętom, roślinom, grzybom, pierwotniakom i drobnoustrojom tlenowym (aerobionty), stanowią kataboliczne procesy biochemiczne rozkładu (utleniania, inaczej – spalania) sacharydów i kwasów tłuszczowych, przebiegające w cytoplazmie, oraz przemiany w cyklu Krebsa (w mitochondriach). Utlenianie związków organicznych do prostych związków nieorganicznych stanowi zatem wtórny proces dostarczający energii, która uprzednio została nagromadzona w związkach organicznych wyprodukowanych podczas chemosyntezy lub fotosyntezy.

Oddychanie tlenowe nie jest tak proste, jak może to wynikać z ryciny 17, ale nie będę szczegółowo jego rozpatrywał. Ważne podkreślenia jest raczej to, że ilości energii uzyskiwane w oddychaniu tlenowym są wielokrotnie większe w porównaniu z oddychaniem beztlenowym. Glikoliza uwalnia jedynie bardzo małą część potencjalnie dostępnej energii chemicznej. Produkty glikolizy (np. mleczan) mają postać jeszcze dość złożonej cząsteczki, której atomy węgla wciąż znajdują się w tym samym stanie utlenienia. Natomiast w procesie oddychania tlenowego cząsteczki glukozy ulegają całkowitemu utlenieniu do bardzo prostych i mniejszych cząsteczek – dwutlenku węgla i wody.

Zewnętrzny przejaw oddychania tlenowego, to jest procesu rozkładu różnych substancji organicznych, dostarczającego niezbędnej do życia energii, polega na pobieraniu tlenu, wydaleniu dwutlenku węgla, wody i wydzielaniu niewielkich ilości ciepła. Wśród organizmów występujących na naszej planecie najpopularniejszy proces oddychania polega na utlenianiu glukozy. Zjawisko to można zapisać równaniem: $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 36ADP + 36P_n \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 36ATP$. Energia uzyskana z utleniania najczęściej zostaje uwięziona w postaci adenozynotrójfosforanu (ATP). W porównaniu z poprzednimi szlakami metabolicznymi zysk energetyczny okazuje się tu największy i niemal całkowity. W przeliczeniu na efektywność, oddychanie tlenowe dostarcza 36 z 38 jednostek energii dostępnej w cząsteczce glukozy. Natomiast cały proces zasadniczo sprowadzić można do trzech etapów. Na pierwszym etapie, w procesie glikolizy, znanym nam z występowania u najdawniejszych heterotrofów anaerobowych, powstaje kwas pirogronowy i dwie cząsteczki ATP. Na drugim etapie, w cyklu kwasu cytrynowego, kwas pirogronowy podlega rozkładowi na dodatkowe dwie cząsteczki ATP, dwutlenek węgla i elektrony. Na trzecim etapie, zostaje doprowadzony cząsteczkowy tlen i elektrony z cyklu kwasu cytrynowego, które transportowane przez enzymatycznie kontrolowany łańcuch elektronowych nośników uwalniają 32 cząsteczki ATP. Tak więc, w wyniku oddychania tlenowego z rozłożenia jednej cząsteczki glukozy powstaje 16 razy więcej cząsteczek ATP niż w procesie oddychania beztlenowego (fermentacji). Z danych tych wyraźnie wynika, jak bardzo ewolucja udoskonaliła fermentację, rozbudowując ją do tlenowego rozkładania związków organicznych. Proces ten, obecnie najefektywniejszy pod względem sprawności w uzyskiwaniu energii, pozostaje też bezkonkurencyjny w porównaniu z najbardziej wydajnymi urządzeniami stworzonymi przez człowieka. Niestety, aby organizmy mogły skutecznie korzystać z tej możliwości zdobywania energii, musiało pojawić się odnawialne źródło „paliwa”. Stało się to domeną autotrofów zamkających tym samym obieg materii i energii w przyrodzie.

Pełna autonomia

Samonapędzająca się machina życia ostatecznie „rozwiązała” problem braku paliwa glukozowego z powstaniem autotrofii. Początkowo bogatych w energię związków organicznych dostarczały bakterie chemoautotroficzne. Odznaczały się one umiejętnością syntezy związków organicznych z CO₂ przy użyciu energii z utleniania prostych substancji nieorganicznych, jak H₂S, NH₃, lub organicznych, jak metan, nie potrzebując do tego światła słonecznego. Nie tolerowały natomiast braku wolnego tlenu. Niestety, niska wydajność energetyczna tego procesu oraz ograniczone zasoby donorów wodoru (siarkowodór, wodór) nie zapewniały ekspansji życia.

Istotnym ulepszeniem, umożliwiającym dalszą wędrówkę życia, stała się fotosynteza, w której komórki wykorzystując energię słoneczną, przetwarzają ją w energię chemiczną, udoskonalając wytwarzanie znacznie więcej cukrów z CO₂ i protonów H⁺. Obecnie zdolnością przeprowadzania fotosyntezy odznaczają się zarówno organizmy prokariotyczne, jak i eukariotyczne. Bliższe nam filogenetycznie eukarionty fotosyntetyzujące obejmują: zielone rośliny wyższe, zielone, brązowe i czerwone glony, a także niektóre pierwotniaki. Fotosyntetyzujące prokarioty to z kolei sinice – zielone i purpurowe bakterie. Wbrew powszechnemu pogładowi o ich drugorzędnym znaczeniu należy wiedzieć, że znacznie ponad połowę całkowitej fotosyntezy na Ziemi przeprowadzają właśnie jednokomórkowe mikroorganizmy i glony.

Wszystkie komórki uczestniczące w tym procesie, podobnie jak w przypadku oddychania, można podzielić również na dwie grupy. Do pierwszej należą te, które przejawiają prymitywną formę fotosyntezy – anoksygenową – przebiegającą w warunkach beztlenowych. Do drugiej, określanej jako „postępowa”, zalicza się organizmy oksygenowe, fotosyntetyzujące w warunkach tlenowych. W pierwszym przypadku (fotosystem I) za syntezę cukrów odpowiada bakteriochlorofil (chlorofil *a* i β -karoten), a protony H⁺ pochodzą z H₂S, gazowego H₂ lub związków organicznych (np. z kwasu mlekowego). Pobranie wodoru z jego gazowej cząsteczki lub ze związku organicznego nie wymaga wiele energii, może nieco więcej z H₂S (78 kcal). Jest to zatem tania odmiana fotosyntezy. Przeprowadzają ją bakterie zwane beztlenowcami bezwzględными, które ani nie wytwarzają, ani nie zużywają tlenu, gdyż pozostaje on dla nich toksyczny. Produktem ubocznym tej prymitywnej odmiany fotosyntezy zostaje najczęściej siarka⁶³, uwalniana na zewnątrz przez powszechnie występujące zielone bakterie siarkowe. Wykorzystują one do syntezy cukrów siarkowodór zgodnie z reakcją: $2\text{H}_2\text{S} + \text{CO}_2 \rightarrow (\text{CH}_2\text{O}) + \text{H}_2\text{O} + 2\text{S}$.

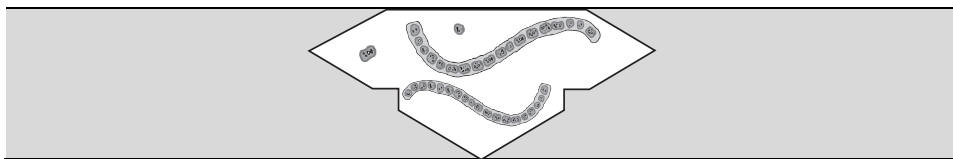
⁶³ W zależności od związku mającego właściwości donora wodoru (H₂D) produktem końcowym będzie jego forma utleniona (D), co wynika z równania fotosyntezy: $2\text{H}_2\text{D} + \text{CO}_2 \rightarrow (\text{CH}_2\text{O}) + \text{H}_2\text{O} + 2\text{D}$.

W drugiej odmianie fotosyntezy [fotosystem II, postępowy: $(\text{H}_2\text{O})_n + (\text{CO}_2)_n \rightarrow (\text{CH}_2\text{O})_n + (\text{O}_2)$] podstawę stanowi komplet barwników zawierający chlorofil: *a*, *b*, *c*, *d*, który aktywują fale o mniejszej długości niż w bakteriochlorofilu. Donorem wodoru jest woda. W cząsteczce wody wodór i tlen są mocno związane, zatem ich rozłączenie wymaga znacznie więcej energii (118 kcal) niż rozłączenie na przykład H_2S . Niemniej, z wyjątkiem niektórych bakterii, wszystkie organizmy korzystające z fotosystemu II⁶⁴ wykorzystują wodę, rzadziej wodór, jako donor elektronów do redukcji CO_2 . Produktem ubocznym tego działania jest uwolnienie tlenu z wody, a nie z CO_2 .

Obecnie przyjmuje się, że w trakcie ewolucji biologicznej fotosystem I wykształcił się jako pierwszy. Odbywa się on w warunkach beztlenowych, a do syntezy bakteriochlorofilu nie wymaga molekularnego tlenu, tak jak ma to miejsce w przypadku chlorofilu, gdzie na jednym z etapów jego syntezy potrzebny jest wolny tlen. Uważa się zatem, że fotosystem II mógł pojawić się dopiero wówczas, kiedy w wyniku fotodysocjacji wody wyzwoliły się dostateczne ilości wolnego tlenu. Falstart beztlenowych fotoautotrofów nie przeszkodził jednak temu, żeby to właśnie fotoautotrofy aerobowe, korzystające z II systemu fotosyntezy, opanowały praktycznie wszystkie środowiska na naszej planecie.

Można by zatem zapytać: Dlaczego sinice z bardziej złożoną, oksygenową fotosyntezą, zużywającą więcej energii, ostatecznie wygrały wyścig z fotosyntetyzującymi bakteriami, które nie dość, że pojawiły się wcześniej, to jeszcze zużywały mniej energii w swej „prymitywnej” fotosyntezie? Częściowo odpowiedź kryje się w dostępności wodoru i toksyczności tlenu dla bakterii, a dokładnie dla bakteriochlorofilu. Główna słabość fotosyntezy beztlenowej polegała na przywiązaniu form żywych do miejsc zasobnych w wodór w postaci nadającej się przez nie do wykorzystania. Takich miejsc nie było za wiele, a te które okazały się dostępne, wiązały się z gorącymi źródłami oraz podmorskimi szczelinami i kominami hydrotermalnymi. Dla organizmów korzystających z fotosystemu II źródłem pozyskiwania wodoru stała się wszechobecna woda. Po wytworzeniu sposobu pozyskiwania tego pierwiastka z wody organizmy tlenowe szybko opanowały Ziemię. Dodatkowo tlen jako produkt ich przemiany materii okazał się zabójczy dla organizmów beztlenowych i powodował unicestwienie przede wszystkim tych, które nie miały zdolności aktywnego poruszania się. Pozostałe zostały zepchnięte na większe głębokości, z ograniczonym dostępem do światła słonecznego, a tym samym pozbawione możliwości rozwoju i ekspansji. W rezultacie, w konkurencyjnym opanowywaniu płytkich środowisk z dużą ilością światła, w walce o przetrwanie wygrać musiały sinice.

⁶⁴ To jest prokariota: sinice, które w beztlenowych warunkach mogą korzystać z I systemu fotosyntezy, bakterie zielone i purpurowe; eukariota: rośliny zielone, brązowe i czerwone glony, a także jednokomórkowe euglenoidy, bruzdnice, okrzemki.



WŁADCY ZIEMI

W świetle odkryć z ostatnich kilku dziesięcioleci wydaje się, że biogeneza na bardzo wczesnych etapach była łatwiejsza, niż sądzono jeszcze przed półwieczem. Swój sukces zawdzięcza ona głównie zdolności materii do samoorganizacji w sprzyjających warunkach, a więc ewolucji, która prawdopodobnie pozostaje na trwałe związana z materią i pojawiła się z nią.

Kiedyś przyjmowano, że powstanie życia zajęło kilka miliardów lat. Dziś wiadomo, że pojawić się ono mogło, gdy tylko Ziemia ostygła poniżej temperatury skraplania wody, co potwierdzić można w każdym dobrze wyposażonym laboratorium biochemicznym. I nawet jeśli przeprowadzenie niektórych z tych doświadczeń wymaga kilku miesięcy, to i tak w skali geologicznej czas temu poświęcony trwałby tylko chwilę, zaledwie ułamek sekundy w przyjętej przez nas skali czasu. W historii życia na naszej planecie czas z pewnością nie mógł być czynnikiem ograniczającym. W 1964 r. biochemik George Wald wyraził się wręcz, że

[...] to czas jest w rzeczywistości bohaterem akcji. [...] Przy tak wielkim jego zapasie, niemożliwe staje się możliwym, możliwe prawdopodobnym, a prawdopodobne wręcz pewnym.

Czas mógł stanowić więc siłę napędową rozwoju i ewolucji wszystkiego, włącznie z uzyskaniem przez *Homo sapiens* świadomości swego istnienia. Uwzględniając powodzenia licznych eksperymentów, zyskujemy dziś również całkiem realne podstawy, aby twierdzić, że nawet w kategorii rachunku prawdopodobieństwa powstanie żywych form z martwej materii staje się przynajmniej możliwe.

Jak pamiętamy, niespełna 3,5 mld lat temu egzystowały już znane nam bardzo proste komórki, potomkowie wciąż jeszcze bliżej nieokreślonych

LUCA i jednocześnie przodkowie wszystkich komórek rozwijających się na naszym globie. Wyposażone w błony, fizycznie odgraniczające je od środowiska, prowadziły one prosty metabolizm beztlenowy. W roli nośnika informacji genetycznych wykorzystywały kwasy nukleinowe, miały ten sam kod genetyczny oraz korzystały z tych samych stereoizomerów aminokwasów, L-aminokwasów. Nie miały natomiast jeszcze jądra komórkowego ani ograniczonych błonami organelli, takich jak mitochondria czy chloroplasty. Należały więc do prokariotów. Wszystkie te struktury, funkcjonujące do dzisiaj, świadczą zatem o tym, że nawet jeśli rozmaite procesy życiowe wykształcały się na Ziemi niezależnie i wielokrotnie, cała dzisiejsza biosfera ma jeden rodowód, wywodzący się od LUCA. I choć badacze różnią się w poglądach odnośnie pierwszych etapów formowania się komórki, większość, łącznie z Orgelem (1992), twierdzi, że już zarodki ziemskiego życia (LUCA) musiały zawierać fundamentalne, a więc wszystkie wspólne cechy współczesnych form życia. Zdaniem Orgela, jest niemożliwe, by tak powszechne atrybuty świata ożywionego, jak białka, kod genetyczny, metabolizm wykształciły się niezależnie. Inni naukowcy (Penny, Poole 1999) podążają jeszcze dalej i postulują hipotezę, że zamiast jednego rodzaju organizmów w roli ostatniego uniwersalnego wspólnego przodka wystąpiły populacje organizmów wymieniających między sobą geny.

Niestety, nie udowodnimy, że najstarsza komórka, jaką znajdziemy w stanie kopalnym, będzie ową najprostszą, jaka mogłaby w ogóle istnieć. Możemy jednak wyobrazić sobie dzisiaj mniejsze, a przez to mniej wydajne żywe organizmy (np. chemotony, cykle czy hipercykle), które potrzebowały mniej informacji niż zawiera materiał genetyczny bakterii czy sinicy, a więc stosunkowo wyszukanych struktur komórkowych. Pewnym pozostaje natomiast, w co dziś już prawie nikt nie wątpi, że pojawienie się pierwszych żywych protokomórek, dla których substancje organiczne stanowiły pożywkę, zablokowało możliwość dalszej biogenezy na Ziemi. Późniejsze zmiany warunków fizycznych i chemicznych, w tym zaistnienie tlenowej atmosfery, unicestwiło szanse tworzenia, wystarczająco długiego przetrwania i gromadzenia się samorzutnie powstałych cząsteczek organicznych, a zatem wykluczyło istnienie na Ziemi alternatywnych światów organicznych.

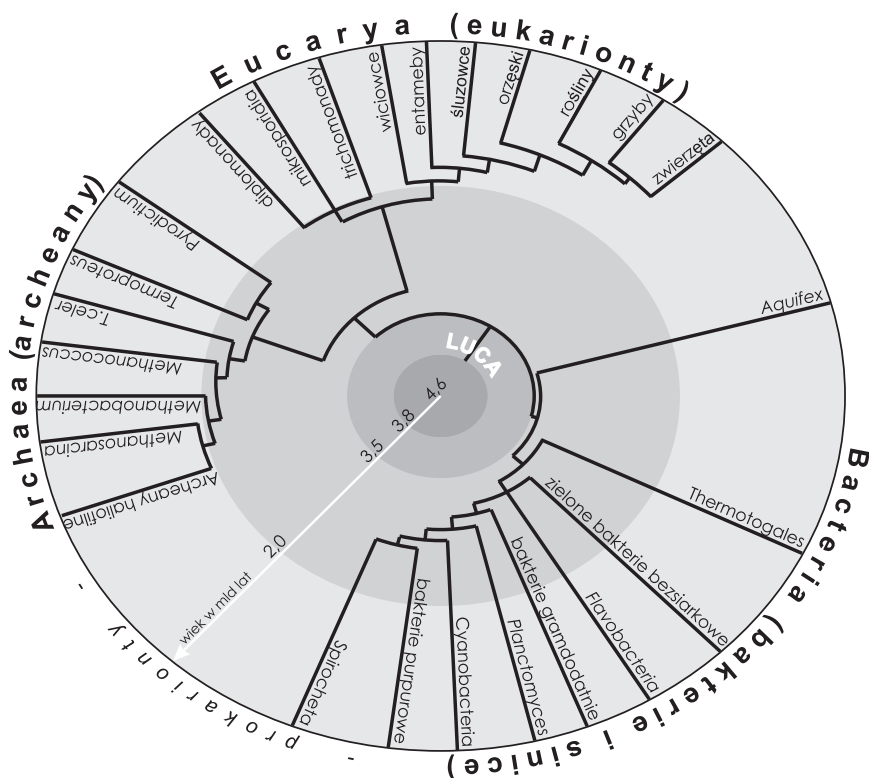
Style życia

Współczesna taksonomia dokonuje klasyfikacji życia w trzech domenach⁶⁵. Czas powstania organizmów należących do każdej z nich pozostaje w sferze spekulacji. Domena bakterii najprawdopodobniej stanowiła pierw-

⁶⁵ Domeny są formalnymi jednostkami systematycznymi wyższej rangi od królestwa.

szą grupę, która około 3,5 mld lat temu wyewoluowała z LUCA. Półtora miliarda lat później, około 2 mld lat wstecz (Woese, Gogarten 1999), czyli zgodnie z naszym kalendarzem 24 lipca pojawiły się archeany i eukarionty – organizmy jeszcze jednokomórkowe, ale zawierające już wyodrębnione jądro komórkowe. Z porównania sekwencji nukleotydów wynika, że eukarionty pozostają bliżej spokrewnione z archeanami niż bakterie; natomiast ostatni wspólny przodek wszystkich dzisiejszych form życia to organizm zajmujący pozycję pomiędzy bakteriami i archeanami (ryc. 18).

Znany nam świat organiczny, ten kopalny i współczesny, można zatem zaklasyfikować do jednej z trzech głównych grup – domen: **Eucarya**, formy z chromosomami zebranymi w jądro komórkowe; **Archaea**, bezjądrowe drobnoustroje, do których należą jedynie organizmy wytwarzające metan oraz wiele tak zwanych ekstremofili, przystosowanych do życia w środowiskach ekstremalnie: gorących, zimnych, kwaśnych czy zasolonych; **Bacteria**, wytwarzające tlen sinice i wszystkie pozostałe bakterie.



Ryc. 18. Uprozczone, uniwersalne drzewo rodowe, opracowane na podstawie podjednostki „16S” rRNA (wg Haggerty i in. 2009)

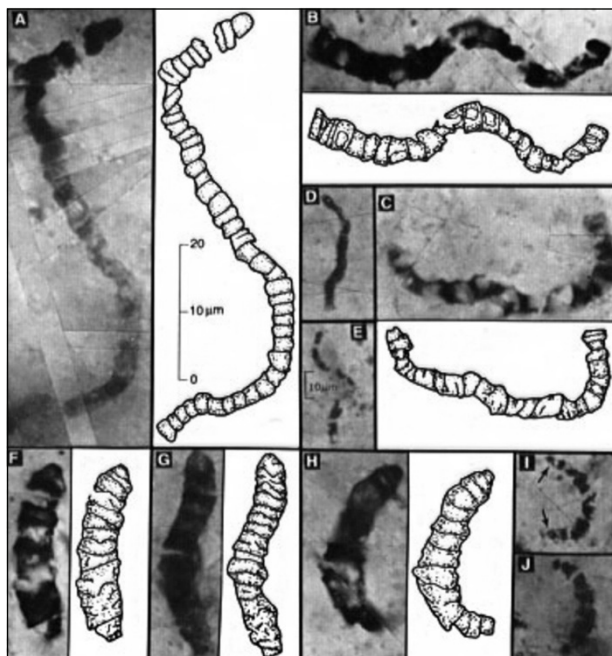
To drzewo filogenetyczne pokazuje jeszcze trzy ważne cechy dzisiejszego świata organicznego. Otóż, rośliny i zwierzęta, najbardziej znane formy życia, reprezentują tylko dwie z blisko 30 głównych gałęzi ewolucyjnych. Ponadto owo drzewo w przeważającej mierze tworzą mikroorganizmy. Natomiast organizmy dostatecznie duże (rośliny, grzyby i zwierzęta), które można zobaczyć bez użycia mikroskopu, stanowią jedynie trzy gałęzie, z których każda jest reprezentowana również przez formy mikroskopijnych rozmiarów.

Niestety, aby wykazać istnienie w prekambrze form prostszych od znanego nam życia jednokomórkowego czy chociażby prymitywnych przedstawicieli tych domen, należałoby pokonać barierę braku odpowiednio starych, nieprzetopionych skał. To, jak wiadomo, okazuje się mało realne i dlatego także z tego powodu na Ziemi prawdopodobnie nigdy nie znajdziemy śladu pierwszego życia. Choć w bardzo wczesnym okresie istnienia planety mogło wielokrotnie dochodzić do jego pojawiania się, to miało ono niewielkie szanse na przetrwanie. Większość prób biogenezy (o ile nie wszystkie), które wystąpiły przed 3,8 mld lat temu, musiały po tym okresie „sterylizacji” tworzyć się raczej od nowa. Dodatkową trudność w zachowaniu się tych najstarszych organizmów sprawia fakt, że nie miały one mineralnych szkieletów, co warto tu raz jeszcze przypomnieć. W związku z tym

Tabela 9. Wybrane przykłady najstarszych złazisk zawierających mikroskamieniałości i węgiel, najprawdopodobniej organicznego pochodzenia (za: Lanier 1989; Cloud Jr., Gruner, Hagen 1965; Schopf, Kvenovold, Barghoorn 1968; Engel i in. 1968; Nagy 1974; Zuilen van i in. 2003; Schopf 2002; Sugitani i in. 2007)

Rok odkrycia	Formacja	Przykłady	Wiek [Ga]
1954	Gunflint, Kanada	jednokomórkowe eukarionty, sinice, włókniste bakterie, Acritarcha	2,00
1965	Soudan Iron, USA	Acritarcha, stromatolity	2,70
1967	Fig Tree, Afryka S	bakterie, sinice, stromatolity, Acritarcha	3,10
1968	Onverwacht Afryka S	glonopodobne mikroskamieniałości	3,20
1974	Transvaal Afryka S	zróżnicowane komórki glonów, stromatolity	2,20
1977	Suazi (Swaziland), Afryka S	sinice, bakterie	3,40
1979	Isua (kwarcyty), Grenlandia W	włókniste struktury węglowe	3,80
1986/1993	Apex, Australia W	sinice i stromatolity	3,47
1988	Isua, Grenlandia W	izotopy węgla w skałach osadowych	3,80
2000	Pilbara, Australia	spirytyzowane mikroskamieniałości, 2 μ m szer., 300 μ m dł.	3,24

pozostały po nich co najwyżej tylko chemiczne ślady w postaci węglistych substancji o cechach charakterystycznych dla związków chemicznych, wytworzonych biologicznie (biowskaźniki). Mikroskopijne, jednokomórkowe organizmy, twórcy tych biowskaźników, znajdujące się w najstarszych skałach, które po miliardach lat działania drastycznych, termicznych i ciśnieniowych procesów geologicznych uległy wielokrotnym przeobrażeniom, stały się nieodróżnialne od skał będących ich cmentarzyskiem. Niemniej niektóre ze znalezisk próbuje się połączyć z ich organicznym pochodzeniem (tab. 9).



Ryc. 19. Mikroskamieniałości wczesnego archaiku, z czertów Apex, datowane na $3,465 \text{ Ga} \pm 5 \text{ Ma}$: A, B – *Primaevifilum amoenum*, C–F – *Archaeosclatorioropsis disciformis*, G – *Primaevifilum delicatulum*, H–J – *Primaevifilum conicoterminatum* (Schopf 2002)

Dziś, ponad wszelką wątpliwość za najstarsze i bezsporne świadectwa życia uważa się struktury odnalezione w 1986 r. w zachodniej Australii, na kratonie Pilbara, w czertach⁶⁶ Apex (ryc. 19). Pierwotnie osady te tworzyły się w oceanach i dawno temu uległy przemianom. Niemniej skamieniałości owe zachowały organiczną substancję bogatą w węgiel. Warstwa czertu ze skamieniałościami z Apex leży między dwoma pokładami law wulka-

⁶⁶ Czert – zbita, twarda skała krzemionkowa.

nicznych, co umożliwiło dokładne jego datowanie na okres między 3,47 a 3,46 mld lat. Skamieniałości stamtąd pochodzące mają zróżnicowane kształty, od kulistych przez wydłużone do nitkowatych. Na ile są one spokrewnione z dzisiejszymi organizmami? Z izotopów węgla wynika, że były to zarówno organizmy heterotroficzne, jak i autotroficzne, a brak struktur wewnątrzkomórkowych sugeruje przynależność obu form do prokariotów, a dokładniej bakterii i sinic. W uniwersalnym drzewie rodowym, w którym wzajemne pokrewieństwo większych grup systematycznych ustalono na podstawie porównania sekwencji zasad azotowych w rybosomalnym RNA, mieściłyby się one w domenie Bacteria.

Bakterie i sinice

Carl Woese bakterie i sinice wyodrębnił pod koniec XX w. (1994) jako jedną z trzech głównych domen świata żywego⁶⁷. Domena Bacteria obejmuje liczne formy samo- i cudzożywnych jednokomórkowych lub kolonijnych organizmów bezjądrowych, zdolnych do życia w bardzo różnych warunkach i spotykanych w całej biosferze. Mają one materiał genetyczny w postaci genoforu – nici DNA swobodnie występującej w cytoplazmie. Ich genom jest stosunkowo niewielki i pozbawiony intronów, DNA zaś nie jest stabilizowany przez histony. Komórki domeny Bacteria mają kształt paciorkowaty, pałeczkowaty lub skręcony spiralnie. Otacza je błona komórkowa, nie rzadko dwuwarstwowa (jak u bakterii Gram-ujemnych), rozdzielona warstwą mureinową, w której bywają osadzone rzęski bakteryjne odmienne od rzęsek eukariotów.

Mimo ogromnego podobieństwa morfologicznego wszystkich przedstawicieli tej grupy na szczególną uwagę zasługują sinice (cyjanobakterie), które poprzez opanowanie zdolności wykorzystywania energii słonecznej do produkcji substancji pokarmowych odmieniły bezpowrotnie oblicze Ziemi. To one właśnie jako pierwsze, w wyniku fotosyntezy, zaczęły wydalać tlen, stanowiący dla nich zbędny produkt przemiany materii, który okazał się toksyczny dla konkurujących z nimi bakterii beztlenowych. Właściwość ta, połączona ze zdolnością do zużywania tlenu w procesie oddychania, pozwoliła sinicom bardzo szybko zdobyć nowe przestrzenie do życia oraz przez znaczną część archaiku i proterozoiku, od około 3,0 do 0,6 mld lat temu, dominować w oceanach. Na naszym kalendarzu przypadłoby to na

⁶⁷ Wcześniej obowiązywał dwudzielnny podział na organizmy jądrowe (eukarioty) – większość obserwowanego świata żywego i bezjądrowe (prokarioty) – bakterie, cyjanobakterie zwane też sinicami i archebakterie.

okres od 5 maja do 13 listopada. Spośród innych prokariontów wyróżniają się one większymi i bardziej zróżnicowanymi komórkami. Najczęściej występują w trzech formach: kulistych, eliptycznych i nitkowatych. W odróżnieniu od skamieniałości znalezionych w czercie Apex, chaotycznie rozmieszczonych, a przez to budzących wątpliwości co do ich przynależności do sinic (Schopf 2002), młodsze, również współczesne bakterie i sinice najczęściej występują w dużych nagromadzeniach. Bardzo często tworzą warstewki, tak zwane maty z naprzemianlegle występującym osadem węglanowym, rzadziej krzemionkowym lub innym. Takie cykliczne narastanie warstewek, prawdopodobnie związane z sezonalnym zakwitem sinic, w konsekwencji prowadzi do powstawania różnego kształtu budowli organicznych: od płasko rozpościerających się laminitów do kopulastych, kolumnowych struktur zwanych stromatolitami, stanowiącymi skalne odpowiedniki zwapniałych mat sinicowych osiagających nawet kilka metrów wysokości.

Okazałość tych form prowadzi do pytania: Jak doszło do powstania takich struktur? Otóż zdania są podzielone. Na podstawie obserwacji współczesnych sinic wiemy, że wytwarzają one śluzową otoczkę wokół komórek. Pełni ona rolę ochronną przed śmiertelnościami promieniowaniem ultrafioletowym i naprawczą wobec uszkodzeń wywołanych przez to promieniowanie. Do tej otoczki przykleja się muł węglanowy występujący w wodzie morskiej. Systematyczne narastanie warstewek w budowli różni autorzy tłumaczą odmiennym zachowaniem się sinic. Jerzy Dzik (1997) uważa, że charakterystyczne kształty kolumn i stożków wynikają ze zróżnicowanego wzrostu sinic, których rozwój hamuje osad pokrywający matę. Stanley (2005) twierdzi natomiast, że kiedy warstewka sinic zostanie scementowana przez muł i pozbawiona dostępu do światła słonecznego, organizmy te, by przetrwać, porzucają swoje dotychczasowe miejsce bytowania. Opuszczają one zatem swoje osłony śluzowe i przenikają przez ową nadległą warstwę mułu, żeby ponownie wytworzyć kleistą substancję, która znów będzie wyłapywać muł. Sytuacja taka, powtarzając się przez dłuższy czas, doprowadza do powstania wielowarstwowych struktur stromatolitowych. Schopf (2002) zaś skłania się ku pogładowi, iż powstawanie takich budowli wynika ze zdolności sinic do „spelzzywania” z miejsc zbyt silnie nasłonecznionych. Co więcej, autor ów zauważył, że budowa samej struktury jest też bardziej skomplikowana, niż mogłoby się wydawać. Nie tworzą jej wyłącznie bakterie tlenowe. Na uwagę zasługuje fakt, że sinice ograniczają swój zasięg wyłącznie do zewnętrznej maty, gdzie wykorzystują energię słoneczną do wytwarzania substancji organicznej. Poniżej tej warstwy występują tak zwane fakultatywne aeroby. Te na ogół prowadzące metabolizm beztlenowy, ale fotosyntetyzujące bakterie potrafią tu żyć pomimo przykrycia szczelną war-

stwą sinic. Zawdzięczają to bakteriochlorofilowi, który korzysta z innej długości światła, dokładnie tej, która pozostała po odfiltrowaniu przez chlorofil sinic. Ponadto, w przypadku przeniknięcia do nich tlenu są one w stanie go konsumować jak bakterie tlenowe. Poniżej tych uniwersalnych bakterii występują jeszcze archebakterie i bakterie chemoautotroficzne redukujące siarczany. Nie byłyby one w stanie przeżyć w obecności tlenu, dlatego jedynie tam odnalazły przyjazne dla siebie środowisko. W momencie przyrastania kolejnych warstw budowli za przemieszczającymi się ku górze sinicami podążają również pozostałe bakterie z kolejnych, niżej leżących warstewek. Zdaniem Schopfa, dopiero takie narastanie prowadzi do powstania struktur stromatolitowych. Zauważył on również, że oprócz znanych powszechnie stromatolitów jako akrecyjnych struktur: biosedymentacyjnych, drobnowarstwowanych, makroskopowych i wapiennych, powstałych w wyniku działalności mikroorganizmów, głównie fototroficznych prokariotów budujących matę, znane są również warstewki milimetrowych rozmiarów. Zawierają one krzemionkę, fosforany lub materię organiczną, w których z prokariotami mogą współwystępować eukarionty.

Mimo pewnych rozbieżności w określeniu, czym są stromatolity, cechą bezwzględnie wymaganą do takiego sklasyfikowania danej struktury pozostaje biologiczna geneza budujących je warstewek. Najstarsze tego typu struktury liczą około 3,1 mld lat. Znalezione zostały w formacji Fig Tree w południowej Afryce. Nieco tylko młodsze, 3,0 mld lat, są stromatolity z grupy Pongola, również z południowej Afryki. Natomiast najlepiej zachowane struktury stwierdzono w skałach łańcucha Belingwe (Zimbabwe), datowane są na 2,7 mld lat. Formy te wykazują morfologię zbliżoną do współczesnych stromatolitów odkrytych w latach 60. XX w. w lagunie Shark Bay, na zachodnim brzegu Australii (Schopf 2002). Długo uważane za odpowiedniki stromatolitów prekambryjskich różnią się one od nich zasadniczo budową wewnętrzną i składem mineralnym (Kaźmierczak 2011). Natomiast wapienne mikrobiality sodowego jeziora Wan (wschodnia Anatolia) i kraterowego jeziora wyspy Satonda koło Sumbawy (środkowa Indonezja) zdają się być pierwszymi współczesnymi stromatolitami w pełni porównywalnymi ze stromatolitami prekambryjskimi, tak pod względem mikrobiologicznym, jaki i mineralogicznym (Kaźmierczak 2011).

Przyjmuje się, że występowanie stromatolitów w odległych czasach geologicznych, podobnie jak dzisiaj, związane było z obszarami płytkiego morza. Zintensyfikowanemu rozwojowi, który rozpoczął się około 3,0 mld lat temu, prawdopodobnie sprzyjało rozrastanie się kontynentów, a co za tym idzie szelfów kontynentalnych, które stanowią podstawowe środowisko tych organizmów. W tym czasie doszło też do ich znacznego zróżnicowania pod względem morfologicznym (Stanley 2005), natomiast maksimum roz-

woju osiągnęły w mezoproterozoiku, to jest około 1,2 mld lat temu (27 września). Wówczas nabrały też znaczenia stratygraficznego, bowiem na podstawie przyrostów kolejnych warstewek można wyciągać wnioski wykraczające często poza zagadnienie powstania samych stromatolitów. Na przykład z analizy laminacji w stromatolitach pochodzących z okolic Jeziora Niedźwiedziego (Kanada), datowanych na 2,2 mld lat wstecz (10 lipca), wynika, że pływy w tamtym czasie były takie same, jak obecnie. Zatem odległość pomiędzy Ziemią a Księżycem była podobna.

Archeany (archebakterie)

Najprymitywniejszą z żyjących dziś grup organizmów są bezjądrowe, jednokomórkowe archeany, pierwotnie zwane archebakteriami lub archeobakteriami. Z badań genetycznych wynika ich bliższe pokrewieństwo z przodkami eukariontów niż z bakteriami. To właśnie z tego powodu Woese i in. (1990) wydzielili dla nich odrębną domenę świata żywego, obok eukariontów i bakterii. Organizmy te mają otoczkę komórkową zawierającą pseudomureinę. W odróżnieniu od bakterii nie potrafią syntetyzować mureiny ani kwasów tłuszczowych, stąd ich błona komórkowa zbudowana jest z prostego fosfolipidu i izoprenoidów. Ich tRNA i rRNA także różni się od bakteryjnego.

Wiele archeanów to tak zwane ekstremofile. Wyróżnia się wśród nich: psychrofile, termofile (w tym hipertermofile), halofile, acidofile i alkalofile, piezofile (barofile), radiofile i metalofile, kserofile i w końcu endolity oraz hipolity, które kolonizują pęknięcia skalne i spągowe powierzchnie warstw skalnych. Należy zaznaczyć, że drobnoustroje zasiedlające takie środowiska są często adaptowane do kilku skrajnych czynników środowiskowych, co uwzględnia się w ich klasyfikacji i nazewnictwie (piezopsychrofile, halopsychrofile, acidotermofile, piezotermofile itd.).

Jak podaje Turkiewicz (2006), współcześnie występują one w środowiskach, które są: permanentnie zimne (wieczna zmarzlina, lód morski i polarny, gleby polarne i wysokogórskie, zimne wody oceaniczne, np. *Polaromonas vacuolata*, $T_{opt.} = 4^{\circ}\text{C}$) lub gorące (gejzery Parku Narodowego Yellowstone, wrzące jeziora wulkaniczne, podwodne wyloty hydrotermalne, np. *Pyrolobus fumarii*, $T_{max} = 113^{\circ}\text{C}$), silnie kwaśne (obszary bogate w siarkę i piryty, hałdy przy kopalniach węgla, np. *Picrophilus torridus*, $\text{pH}_{opt.} = 0,7$), zasadowe (jeziora sodowe, gleby przesycone węglanami, np. *Bacillus firmus*, $\text{pH}_{opt.} = 10,5$) lub zasolone (Morze Martwe, słone jeziora, przybrzeżne solanki, np. Halobacteriaceae, stężenie soli do 5,2 M), podlegające nieustannemu działaniu wysokiego ciśnienia hydrostatycznego (głębiny

oceanów, np. *Photobacterium*, > 40 MPa), ekstremalnie suche (gorące i zimne pustynie), skażone substancjami radioaktywnymi (radioaktywne ścieki, skażona gleba, reaktory nuklearne, np. *Deinococcus radiodurans*), o wysokiej zawartości metali ciężkich i innych toksycznych substancji (miejsca skażone metalami ciężkimi, np. Hg, Pb, np. *Rhodococcus*). Wiele z tych środowisk jeszcze kilkadziesiąt lat temu uważano za jałowe, bowiem wydawało się, iż żadna forma życia nie jest w stanie w nich przetrwać. Dziś wiemy, że życie rozwija się w nich bujniej, niż sądziliśmy i że zasiedlające te środowiska mikroorganizmy ekstremofilne są często tak dalece zaadaptowane do egzystencji w obecności ekstremalnego czynnika, że środowiska umiarkowane okazują się dla nich zabójcze. Przykładem jest acidofil *Picrophilus torridus*, rosnący optymalnie w pH 0,7 (takim odczynem charakteryzuje się 1,2 M roztwór kwasu siarkowego), który w środowisku o pH = 0 może się jeszcze rozwijać, natomiast w pH powyżej 4 ulega lizie (Ciaramella i in. 2005).

Do niedawna organizmy te, między innymi ze względu na trudności w hodowli i obserwacji (brak możliwości zapewnienia im odpowiednich warunków) pozostawały słabo poznane. Dziś z pomocą przychodzą zaawansowane techniki biologii molekularnej. Wiadomo już, że tajemnica występowania ekstremofili w tak skrajnych środowiskach tkwi w swoistej budowie ich makromolekuł i specyficznych mechanizmach akumulacji energii oraz utrzymujących homeostazę środowiska wewnątrzkomórkowego oraz podtrzymujących stabilność strukturalnych i funkcjonalnych komponentów komórki. Unikatowe sekwencje aminokwasów w białkach strukturalnych i enzymach ekstremofili odpowiadają również za produkcję ochronnych substancji (egzopolimerów, biosurfaktantów, barwników), dobrze rozpuszczalnych i wiążących wodę niskocząsteczkowych związków organicznych o funkcji ochronnej i wielu innych, niezbędnych do prowadzenia prawidłowego metabolizmu i rozwoju komórki w warunkach ekstremalnego biotopu. Wyjątkowej strategii życia tych organizmów sprzyja również unikalny skład lipidów i innych komponentów błonowych, zapewniający płynność oraz stabilność membran, a także ich właściwy transport jonów i biocząsteczek (Fujiwara 2002; Javaux 2006; Pakchung i in. 2006). Swoistą adaptacją jest też zdolność przejścia komórki w stan anabiozy, gdy warunki środowiskowe stają się tak skrajne, że niemożliwy jest nie tylko rozwój czy utrzymanie podstawowego metabolizmu, ale nawet reperacja makromolekuł uszkodzonych przez działanie ekstremalnego czynnika. Jednak ta właściwość jest charakterystyczna dla całego świata drobnoustrojów, nie tylko dla ekstremofili (Turkiewicz 2006).

Rozpiętość warunków środowiskowych, w których żyją ekstremofile, skłania niektórych badaczy do wysuwania przypuszczeń, iż historia tych organizmów może sięgać początków świata organicznego. Niestety trudno

zgodzić się z takim poglądem. Ekstremofile to organizmy wielce wyspecjalizowane, a takie powstają w wyniku długotrwałych procesów ewolucyjnych. Nie mogły zatem one dominować u zarania życia. Bardziej prawdopodobne wydaje się, że dzisiejsze ekstremofile wtórnie zasiedliły swoje środowiska życia, wykształcając w trakcie ewolucji liczne unikatowe adaptacje. Jednakże dla paleontologa nie powinny być one bez znaczenia. Mogą bowiem przybliżyć nam graniczne parametry dla istnienia życia.

Eukarionty

Organizmy eukariotyczne⁶⁸ charakteryzują się znacznie bardziej skomplikowaną strukturą komórkową od opisanych bakterii i archeanów, czyli prokariotów. Do najważniejszej innowacji należy wykształcenie wewnątrzkomórkowych struktur błoniastych, takich jak: jądro komórkowe, mitochondria, plastydy (ciałka roślinne z barwnikami, z których najbardziej znany jest chlorofil). Centralną rolę, co wyrażone zostało w nazwie całej jednostki systematycznej, odgrywa wyodrębnione jądro komórkowe mające materiał genetyczny w liniowych odcinkach, zwanych chromosomami, które przejawiają zdolność do reorganizacji tego materiału.

Dla paleontologów śledzących historię rozwoju organizmów najważniejszą, a przy tym łatwo rozpoznawalną cechą komórek eukariotycznych nie jest ich wyrafinowana budowa wewnętrzna, której detale w materiale kopalnym są nie do wyróżnienia, tylko wielkość. W porównaniu z komórkami prokariotycznymi, o przeciętnej średnicy 5 μm , komórki eukariotyczne z reguły charakteryzują się większymi rozmiarami. Za graniczną ich wielkość przyjęto średnicę 60 μm , ponieważ prokariotyczne komórki takich rozmiarów niemal nigdy nie osiągają. Komórki eukariontów mogą jednak być niekiedy mniejsze od 60 μm , a prokariotyczne większe od 5 μm (nieliczne osiągają średnicę 10 μm , a przedstawiciele dwóch gatunków zbliżają się do granicy 60 μm), komórki o średnicy 10–60 μm traktuje się jako „przypuszczalne eukariotyczne”. W związku z tym przy wyznaczaniu granicy pojawienia się najstarszych eukariontów tych pośrednich wielkości nie uwzględnia się, choć świadomi jesteśmy, iż w związku z powyższym graniczna data pojawienia się pierwszych eukariontów (czytaj komórek większych od 60 μm) pozostanie nieprecyzyjna. Nie można bowiem wykluczyć, że wśród komórek mniejszych od 60 μm , geologicznie starszych, nie znajdują się eukarionty.

⁶⁸ Nazwa eukarionty, z języka greckiego: *eu* (prawdziwy) i *karyon* (jądro), w dosłownym tłumaczeniu znaczy „prawdziwe jądro” lub po prostu „jądrowce”; w odróżnieniu prokarioty z greckiego oznaczają „przedjądrowe”.

Obecnie przyjmuje się, że pojawiły się one około 2,0 mld lat temu (w naszej skali 24 lipca). Z tego bowiem wieku pochodzą czerty formacji Gunflint (Kanada), zawierające już na tyle duże komórki, że nie mogą one świadczyć o ich prokariotycznej naturze. Nie oznacza to wcale, iż eukarionty zdominowały świat. W okresie młodszym od 2,0 mld lat wśród jednokomórkowych organizmów nadal zdecydowanie przeważały prokaryoty, a i dzisiaj ich udział w świecie żywym jest niemały.

Około 1,1 mld lat temu, w domenie Eucarya, wyodrębniły się grzyby i zwierzęta. Są to jednak nadal jednokomórkowe mikroorganizmy. Większe nagromadzenia eukariontów występują dopiero w skałach młodszych od 1,0 mld lat wstecz, a wyraźny przełom w rozwoju tych organizmów nastąpił pod koniec prekambriu. Wtedy zyskały one większe rozmiary. W materiale kopalnym po raz pierwszy można je oglądać bez pomocy mikroskopu.

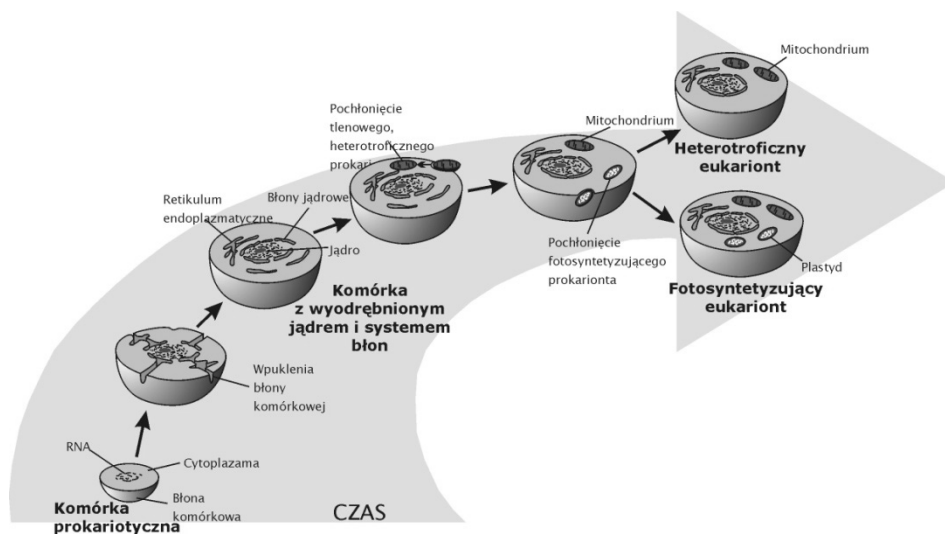
Mając na względzie zgodność badaczy, którzy uznają organizmy prokariotyczne za geologicznie starsze i fizjologicznie prostsze od eukariotycznych, możemy twierdzić, że grupa Eukaryota wywodzi się ewolucyjnie z Procaryota. Natomiast struktura genetyczna prymitywnych eukariontów wskazuje na ich pochodzenie od bakterii (Stanley 2005). Literatura przedmiotu podaje dwie koncepcje powstania komórek eukariotycznych. Jedna, mniej popularna, czyli „teoria” kompartmentacji (autogeniczna) zakłada, że ewolucja odbywała się bądź w obrębie jednej komórki, bądź w wielu niezależnych ciągach pokoleń komórek. Zgodnie z tą propozycją przyjmuje się, że najpierw w obrębie prokariotycznego przodka Eukaryota nastąpiło powielenie genoforów, któremu nie towarzyszył podział komórki. Następnie każdy fragment genoforu podlegał różnicującej ewolucji. W jej wyniku powstały struktury membranowe kontrolowane przez gospodarza. Był nim organizm, w którym chromosomy wyewoluowałyby z genoforu. Dalsze ewolucyjne przemiany fragmentów genoforów zachodziły już wewnątrz własnych błon, a pełna integracja dokonała się dopiero po ostatecznym zróżnicowaniu się potomków pierwotnej komórki eukariotycznej.

Początków drugiej, bardziej prawdopodobnej hipotezy, zwanej dziś symbiotyczną lub endosymbiotyczną, dopatrzyć się już można w pracy Richarda Altmanna z 1890 r. Autor ów pisząc o mitochondriach, nazywa je „bioblastami” (zarodkami życia), które uznawał za autonomiczne organizmy odpowiedzialne za metaboliczne funkcje i dziedziczenie. Do symbiotycznej koncepcji powstania eukariontów nawiązał później rosyjski botanik Konstantin Mereschkowsky (1905). Zasugerowany pracami niemieckiego botanika Andreasa Schimpera (1883), który zauważył, że dzielenie chloroplastów w zielonych roślinach było podobne do tego występującego w wolno żyjących cyjanobakteriach, wstępnie zaproponował, iż zielone rośliny mogły powstać w wyniku symbiotycznego zespolenia się dwóch organizmów.

W 1923 r. ideę symbiotycznego początku mitochondriów podjął Ivan Wallin. Niestety, aż do lat 60. ubiegłego wieku koncepcje te były ignorowane. Ponownie zainteresowano się nimi po odkryciach Stockinga i Gifforda (1959), którzy wykazali, że plastydy i mitochondria zawierają własne DNA.

Największym popularyzatorem symbiotycznego pochodzenia plastydów i mitochondriów jest Lynn Margulis. Nowe światło na tę hipotezę, zwaną przez nią endosymbiotyczną, po raz pierwszy rzuciła w 1966 r. (patrz Sagan 1967). Założeniem jej tezy jest wytworzenie się współzależności i współdziałania pomiędzy różnymi prokariotycznymi organizmami w sytuacji, kiedy jeden pochłonął inny (inne). Żyjąc tak ponad miliard lat, powstały z nich komórki eukariotyczne. W 1970 r., w książce pt. *Początek eukariotycznych komórek*, odnosząc się do swoich tez z 1966 r., Margulis szczegółowo przedstawiła genezę niektórych organelli komórek eukariotycznych. Zasugerowała, że mitochondria mogą być relikdami dawnych bakterii tlenowych, a chloroplasty zmienionymi bakteriami fotosyntetyzującymi (sinicami). Aktualnie jej endosymbiotyczna koncepcja, akceptowana przez naukowców głównego nurtu, uznana jest za kluczową w powstawaniu organelli komórkowych na drodze symbiogenezy⁶⁹. Zdaniem Anderssona (1998), mogło do niej dojść około 2,0 mld lat temu, a komórką bakteryjną, odpowiedzialną za oddychanie, mógł być organizm spokrewniony ze współczesnymi riketsjami. Anderson zakłada, że symbiogeneza mogła zaistnieć w sytuacji, kiedy większa komórka gospodarza próbowała pochłonąć mniejszą riketsję. Proces ten jednak nie udał się przypuszczalnie z powodu rozwiniętych mechanizmów obronnych u tych organizmów. Nie wyklucza się też, że mniejsza komórka mogła próbować pasożytować na większej. Tak czy inaczej, mniejsza komórka przetrwała w większej, stając się samodzielną jednostką. Oddychając tlenem, wykorzystywała uboczne produkty przemiany materii większej komórki, a uzyskaną w ten sposób energię po części oddawała swemu żywicielowi. Pozostając w jego wnętrzu, dzieliła się. W konsekwencji obydwie rodzaje komórek zaczęły żyć razem, czerpiąc obopólne korzyści (ryc. 20). Z czasem komórka żywiciela uzyskała dostęp do genów mniejszej komórki i od tego momentu te dwa organizmy nie mogły już istnieć bez siebie – większy nie przetrwałby bez energii tworzonej przez mniejszy, a mniejszy bez produktów ubocznych przemiany materii większego. Po-

⁶⁹ Symbiogeneza – łączenie się dwóch lub więcej organizmów w celu stworzenia jednego, nowego organizmu. Z koncepcją tą nie zgadzają się niektórzy darwińscy, ponieważ kwestionuje ona centralną zasadę neodarwinizmu, według której odziedziczone wariacje pochodzą głównie z przypadkowych mutacji. Natomiast stosownie do tezy Margulis (1970), nabywanie i akumulacja przypadkowych mutacji nie są wystarczające do wyjaśnienia sposobu dziedziczenia wszystkich zmian. Margulis uważa, że nowe organelle, osobniki i gatunki powstają w wyniku symbiogenezy.



Ryc. 20. Symbiotyczna koncepcja powstania komórek eukariotycznych (wg Doolittle 2000, nieco zmienione)

między „komórką-żywcielem” a jej „rezydentem” utworzyła się symbioza i w ten sposób powstał jeden organizm. W tym scenariuszu mniejsze komórki badacze sklasyfikowali jako mitochondria. Podobny przykład symbiozy i „scalenia” przypuszczalnie wystąpił w przypadku fotosyntetyzujących sinic (Margulis 1970; Bergsland, Haselkorn 1991), które stały się częścią cudzożywnych komórek i przekształciły się w chloroplasty. Ponieważ procesy prowadzone przez symbionty dawały komórkom gospodarzy przewagę ewolucyjną nad pozostałymi organizmami, rosła też liczba środowisk, w których komórki powstałe na drodze symbiogenezy zaczynały dominować. Zdaniem Bergslanda i Haselkorna (1991), dalszym rezultatem tych zmian było rozdzielenie się około miliarda lat temu (ok. 1 października na naszym kalendarzu) eukariotycznych komórek na zdolne do fotosyntezy (rośliny zielone) i inne jądrowce zawierające mitochondria, ale bez chloroplastów.

Chociaż od powstania pierwszych symbiontów minęły przynajmniej 2 mld lat, mitochondria i plastydy jeszcze dzisiaj zdradzają odległą historię swojego początku. Mitochondrialne DNA, podobnie jak DNA organizmów prokariotycznych, zawiera bowiem wysoki procent kodującego DNA. Natomiast DNA jądra eukariotycznych komórek ma więcej niekodujących fragmentów DNA. W konsekwencji pozbawione intronów mitochondrialne geny są krótsze od genów jądrowych. Wiadomo również, że mitochondrialne chromosomy są kołowe, a więc kształtem przypominające bakteryjny materiał genetyczny (Futuyma 2005). Z podobnych analiz przeprowadzo-

nych dla chloroplastów wynika, że one także mają swoje DNA i RNA. Ponadto na pokrewieństwo chloroplastów z sinicami wskazuje również podobna budowa warstwowanych membran, na których znajduje się zielony barwnik, czyli chlorofil absorbujący światło słoneczne i umożliwiający fotosyntezę. W przypadku hipotezy autogenicznej materiał genetyczny wszystkich organelli komórkowych byłby podobny.

Niewykluczone, że podczas rozwoju życia mogło zaistnieć kilka przypadków takiego wchłonięcia pewnych organizmów przez inne. Z pewnością większość owych ataków kończyła się śmiercią dla jednej z konkurujących stron, co sprawiało, iż droga do ostatecznego sukcesu, a więc uformowania się komórki eukariotycznej, była długa i wieloetapowa.

Stanley (2005) uważa nawet, że archaiczne eukarionty nie miały szczególnych cech pozwalających odróżnić je od bakterii, nie wymagały do życia ani chloroplastów, ani mitochondriów, a całą niezbędną energię uzyskiwały bezpośrednio od swojej ofiary, podobnie jak czynią to w dzisiejszych czasach najprymitywniejsze z tych organizmów, prowadzące pasożytniczy tryb życia (np. z rzędu Trichomonadida). Przez setki milionów lat pierwsze eukarionty odróżniały się od bakterii jedynie jądrem komórkowym. Schopf (2002) twierdzi ponadto, że skoro eukarionty mają wspólnego przodka z archeanami, znanymi od co najmniej 2,8 mld lat, to również pierwsze eukarionty musiały istnieć w tym czasie. Wyobraża on sobie najstarsze eukarionty, podobnie jak Stanley, jako małe jednokomórkowe organizmy bez chloroplastów i mitochondriów, prowadzące heterotroficzny i beztlenowy tryb życia.

Wydaje się, że swój ogromny sukces ewolucyjny eukarionty zawdzięczają kumulacji doraźnych zalet wpływających z kolejno zdobywanych elementów, które w optymalnej kombinacji, doborze przez selekcję, dały wysoce zorganizowany układ. Jego podstawowe funkcje życiowe rozdzielone zostały pomiędzy występujące w nim główne organelle, czyli jądro i mitochondria. Konsekwencją posiadania jądra komórkowego jest zdecydowanie większa ilość DNA, a co się z tym wiąże i informacji genetycznej, która z kolei wpływa na wzrost złożoności komórek. Jednak rola jądra nie sprowadza się jedynie do gromadzenia i przechowywania DNA, bo to nie jego ilość jest najistotniejsza w budowie złożonego organizmu, tylko sposób, jaki informacja ta jest powielana w procesie podziału komórki oraz uruchamiana w miarę wzrostu i dojrzewania organizmu. Przemawia za tym fakt, że zawartość DNA w komórkach ludzkich jest pięciokrotnie mniejsza niż u trzaski i około czterdziestokrotnie mniejsza niż u płucodysznej ryby lub lilii. Natomiast mitochondria odgrywają istotną rolę w procesie oddychania i zdobywania energii, a chloroplasty służą do pochłaniania energii światła słonecznego i do produkcji składników pokarmowych.

Powstanie złożonych komórek, a później skomplikowanych organizmów o różnych planach budowy stało się zatem możliwe dzięki temu, że eukarionty odznaczały się zaawansowanym systemem genetycznym, umożliwiającym sprawną replikację dużych ilości DNA. Dzięki temu nie tylko mogły zawierać znacznie więcej genów niż prokaryoty, ale także były i są w stanie tolerować istnienie dużego odsetka DNA „śmieciowego” (nieczynnych kopii genów, powtórzeń, sekwencji niekodujących). Ponadto, w obrębie genów zawierają introny wycinane przed translacją (biosyntezą białka). To z kolei pozwala na łatwiejsze tasowanie odcinków genomu, bo cięcia przypadają rzadko w jego ważnych, kodujących miejscach, a tym samym szybszą ewolucję. Niewidoczne dla doboru mutacje w nieczynnej kopii genu z czasem mogą doprowadzić do powstania genu kodującego nowe białko, o korzystnych właściwościach enzymatycznych lub strukturalnych, bez upośledzenia funkcji wyjściowego białka. Dzięki temu tworzą się całe rodziny podobnych białek o wyspecjalizowanych funkcjach.

Wielokomórkowce

Choć bakterie, archeany i eukarionty nieustannie różnicowały się od momentu powstania, stając się obecnie organizmami bardzo skomplikowanymi i coraz lepiej przystosowanymi do środowiska, aż do 1,8 mld lat wstecz (wg umownego kalendarza do 9 sierpnia), wciąż pozostawały formami jednokomórkowymi.

Stanley (2005) oraz współcześni biolodzy molekularni (np. Wood i in. 2002) identyfikujący genomy organizmów wielokomórkowych, znajdując specyficzne geny, wspólne dla wszystkich wielokomórkowców. Sugerują, że przejście od organizmów jednokomórkowych do organizacji wielokomórkowej mogło dokonać się w bardzo krótkim czasie, około 2,0 mld lat temu. Zdaniem tych autorów przyczyniły się do tego ścieżki metaboliczne niezbędne do wielokomórkowej organizacji, które prawdopodobnie istniały już u jednokomórkowych eukariontów. Bezspornych dowodów na obecność organizmów wielokomórkowych dostarczają dopiero skały formacji żelazistej z Michigan, datowane na 1,85 mld lat (Han, Runnegar 1992; Porter, Knoll 2000). Na naszym kalendarzu byłby to 5 sierpnia. Udokumentowano w nich występowanie najstarszych kolonii eukariotycznych glonów o spiralnie skręconej, wstęgowej strukturze, które nazwano *Grypania* i zaliczono do grupy mezosferomorfów, obejmującej formy o rozmiarach od 60 do 200 μm (Schopf 2002). Są one dość częste w całym młodszym proterozoiku

i wczesnym fanerozoiku. Morfologicznie bardziej zróżnicowane skamieniałości z rozpoznawalnymi szczegółami anatomicznymi pojawiają się w skałach wieku 1,4 mld lat temu (4 września), a około 0,9 mld lat temu (20 października) wyodrębniła się grupa megasferomorfów, jeszcze bardziej skomplikowanych organizmów, rozmiarami przekraczających 200 μm , z których większą część interpretuje się jako eukariotyczne glony (Fedonkin 2003).

Z czasem wśród komórek żyjących w koloniach doszło do wytworzenia podziału zadań między specjalizujące się grupy. Komórki położone na obrzeżach kolonii zajmowały się innymi jej aspektami życia niż te położone w środku (Chaisson 2005). Mimo że linia podziału pomiędzy kolonią wyspecjalizowanych komórek a organizmem wielokomórkowym nie zawsze jest jednoznaczna, około miliarda lat temu (czyli około 3 października) powstały pierwsze rośliny wielokomórkowe, najprawdopodobniej zielenice (Bhattacharya, Medlin 1998). Grupa ta zaczęła się dynamicznie rozwijać, wielokrotnie różnicując się na mniejsze jednostki systematyczne. Około 900 mln lat temu dała ona nowe formy osiągające nawet wielkość ponad centymetra. Możliwe, że w tym czasie właściwa wielokomórkowość pojawiła się też w świecie zwierząt.

W początkowej fazie, około 900 mln lat temu, wielokomórkowe organizmy rozwijały się stosunkowo dynamicznie, dając wiele małych i dużych form. Jednak na kolejnym etapie nastąpił powolny, ale stały ich upadek i około 750 mln lat temu (ok. 1 listopada) wszystkie duże gatunki wymarły, pozostały jedynie te złożone z małych komórek. Wielu naukowców uważa, że prawdopodobną przyczyną stosunkowo szybkiego rozwoju, a następnie „nagłego” wymarcia dużych wielokomórkowców były globalne zmiany środowiska. Otóż gwałtowny rozwój eukariontów mógł nastąpić po powstaniu stabilnych i bogatych w tlen przestrzeni życiowych, szczególnie sprzyjających rozwojowi oddychających tlenem zwierząt. Nie bez znaczenia okazało się też powstanie, mniej więcej w tym samym czasie, meiotycznego sposobu rozmnażania, czyli płci⁷⁰. Natomiast za wymieranie odpowiadało przypuszczalnie zachwianie zawartości tlenu i dwutlenku węgla w atmosferze, prowadzące na przemian albo do tak srogich zlodowaceń, że zamarzała nawet powierzchnia wszystkich oceanów (Hoffman, Schrag 2000), albo do efektów cieplarnianych. Schopf (2002) z tymi wydarzeniami wiąże co naj-

⁷⁰ Zewnętrznym objawem mejozy jest powstanie czterech zamiast dwóch, jak w podziale mitotycznym, komórek potomnych. Tworzą one charakterystyczne zespoły – tetrady. Ponieważ najstarsze eukariotyczne tetrady pochodzą ze skał liczących 1,5 mld lat (Amelia Dolomite, Australia), można przypuszczać, że już wtedy istniała przemiana pokoleń. Wynikiem wykształcenia się płci był wzrost tempa ewolucji i znaczne zwiększenie różnorodności powstających organizmów.

mniej cztery wielkie epoki lodowe w proterozoiku. Czynnikiem, który prawdopodobnie je zapoczątkował, to obniżenie globalnej temperatury spowodowane odprowadzeniem znacznych ilości dwutlenku węgla z atmosfery przez masowo rozwijające się organizmy fotosyntetyzujące i uwięzienie węgla w organizmach, ich szczątkach oraz w skałach węglanowych. W związku z tym z upływem czasu ilość ciepła pochłaniana przez atmosferyczny dwutlenek węgla stopniowo malała, powodując systematyczne ochładzanie się klimatu, prowadzące ostatecznie do powstania lodowców. Początkowo rozwijały się one jedynie w strefach biegunowych, ale nie trzeba było długo czekać, aby odbijanie światła słonecznego od coraz bardziej rozrastających się lodowców, w coraz większych ilościach, uruchomiło swoisty mechanizm spustowy prowadzący do lawinowego rozwoju globalnego zlodowacenia. W ten sposób spowodowane zostało, około 770 mln lat temu (ok. 30 października), zamarznięcie całej kuli ziemskiej, ze strefą równikową włącznie. Według rosyjskiego badacza Fedonkina (2003), zlodowacenia dokonały gruntownych przemian w środowiskach. Poziom morza obniżył się o około 250–300 m. Szelfy zostały odsłonięte i stały się częścią lądów. To z kolei spowodowało, że pozbawione płytkich stref środowiska oceaniczne stawały się coraz mniej przyjazne, szczególnie dla dużych jednokomórkowych glonów, które aby żyć, musiały (i obecnie muszą) wytwarzać większe ilości glukozy niż mniejsze formy, a to w warunkach utrudnionej fotosyntezy stawało się mało wydajne⁷¹. Przetrwać mogły zatem tylko te, które mogły unosić się w górnych partiach toni wodnej. Jednakże i one, z uwagi na duże zawartości tlenu, nie mogły syntetyzować glukozy z maksymalną wydajnością. Z czasem pewne grupy komórek w organizmach wielokomórkowych uzyskiwały różnorodne specjalizacje, co uzależniało je od siebie w coraz większym stopniu. W konsekwencji te odizolowane od skupisk obumierały, a współdziałające z sobą przystosowały się do wykonywania określonych funkcji na rzecz całego organizmu.

Dopiero po 20 mln lat, w naszej skali po około dwóch dniach (dla porównania, ostatnie zlodowacenie plejstoceniowe, trwające kilkadziesiąt tysięcy lat, u nas zajęłoby nie więcej niż 10 min!), z wulkanów wydostały się wystarczające ilości dwutlenku węgla, by wywołać efekt cieplarniany i podnieść temperaturę Ziemi. Mniej więcej w tym samym czasie, czyli około 750 mln lat temu (w skali naszego kalendarza 5 listopada), trwało już „preludium” do mającego niebawem rozpocząć się „maratonu” organizmów tkankowych.

⁷¹ Po obniżeniu się poziomu morza paradoksalnie brakowało płytkowodnych stref, gdyż linie brzegowe przesunęły się do skłonu kontynentalnego; najbliższe dna znajdowały się w związku z tym na głębokości kilkuset lub nawet kilku tysięcy metrów, a więc znacznie poniżej 60-metrowej strefy fotycznej, do której średnio docierają promienie słoneczne.

Tkankowce (Metazoa)

Najstarsze tkankowce wyprowadza się od organizmów wielokomórkowych i co do tego większość badaczy (Glaessner, Daily 1959; Glaessner, Wade 1966; Wade 1971, 1972; Fedonkin 2003) nie ma wątpliwości.

Problemem pozostaje natomiast jednoznaczne postawienie czasowej granicy rozdzielającej najstarsze wielokomórkowce od tkankowców. Tu nie zawsze autorzy prezentują ten sam pogląd. Różna interpretacja najstarszych prekambryjskich makroskamieniałości sprawia, że nawet tak złożona forma życia, jak *Horodyskia moniliformis* (Yochelson, Fedonkin 2000), znaleziona w Montanie i zachodniej Australii, w skałach wieku 1,5 mld lat (w naszej skali 2 września), przez jednych uważana jest za kolonijnego, bentonicznego i eukariotycznego wielokomórkowca (Horodyski 1982), przez innych za organizm z tkankową organizacją komórek, przypuszczalnie nawet o zwierzęcej naturze (Fedonkin, Yochelson 2002). Ci ostatni badacze przekonują nas, że szerokie i do 1 cm wysokie osobniki (zooidy) łączyły się przez wspólne ciało (stolon), tworząc w ten sposób kolonię o długości dochodzącej do 30 cm. Według tych autorów rozmiary oraz złożony mechanizm wzrostu, ze sztywnymi ścianami zooidów i mocnym stolonem, wskazują na tkankowy stopień organizacji *Horodyskia*. Przyjmując poprawność tej interpretacji, należy uznać, że rodzaj ten wyznacza zarówno pierwsze pojawienie się na Ziemi złożonego organizmu tkankowego, jak również, że stanowi on najstarszy kopalny zapis istnienia zwierząt. Natomiast bezspornym organizmem zwierzęcym jest opisany w 1998 r. okaz z rodzaju *Parmia*, zinterpretowany jako przodek pierścienic. Został on znaleziony w skałach platformy syberyjskiej (Gnilovskaya 1998; Gnilovskaya i in. 2000), datowanych na 1,0 mld lat (dla przypomnienia, w naszej skali byłoby to ok. 20 października).

W ostatnich latach w określaniu wieku rozdzielania się głównych grup ewolucyjnych z pomocą przychodzą biolodzy molekularni. Wyniki ich badań należy jednak traktować z ostrożnością, ponieważ we wszystkich przypadkach wysuwają oni daty szacunkowe obwarowane wieloma założeniami, jak chociażby takim, dość mało prawdopodobnym, że tempo ewolucji w prekambrze było podobne do tego w fanerozoiku i przebiegało z podobną intensywnością we wszystkich grupach organizmów. I choć istnieją konflikty pomiędzy modelami zaproponowanymi przez badaczy molekularnych a tradycyjnym datowaniem, wynikającym z zapisu kopalnego, przy braku innych możliwości, owe modele często dają pewne wyobrażenie przynajmniej o kolejności wydarzeń w świecie ożywionym. I tak, ekstrapolując wstecz rozdzielanie się genów różnych grup organizmów, można przyjąć, że zwierzęta mogły wyodrębnić się od roślin i grzybów już ponad 1,6 mld lat temu (Heckman i in. 2001). To molekularne określenie wieku przesuwają za-

tem wstecz moment pojawienia się najstarszego życia zwierzęcego o 100 mln lat w stosunku do wskazań zapisów kopalnych. Jest ona wystarczająco bliska obrazowi proponowanemu przez tradycyjną paleontologię, podobnie jak kolejna, otrzymana z analizy molekularnej 18 genów kodujących białka zwierzęce. Tu biolodzy wykazali, że strunowce oddzieliły się od bezkręgowców około 600,0 mln lat temu (Ayala i in. 1998). W tym czasie istniał już bardzo zróżnicowany świat organiczny, w literaturze naukowej określany terminem „fauna z Ediacara” lub „wendozoa”. Pierwsze, częściej używane określenie pochodzi od nazwy miejsca ich znalezienia: w nieczynnej kopalni miedzi „Ediacara” na wzgórzach Flinders Range, w południowej Australii. Drugie zaś pochodzi od nazwy dawnego okresu geologicznego, najmłodszego prekambriu. Dziś oba określenia nadal są stosowane, mimo że po latach badań⁷² okazało się, iż ta późnoprekambryjska fauna charakteryzuje się znacznie większym rozprzestrzenieniem niż pierwotnie przypuszczano. Do ważniejszych stanowisk jej występowania, poza Australią należą: Nowa Fundlandia, wybrzeże Morza Białego, Syberia, Szwecja, Namibia, Walia, południowe Chiny, Ameryka Południowa oraz najmłodsze zbiorowisko pochodzące z Grupy Ara w Omanie, zawierające podobne organizmy datowane od 548,8 do 543,0 mln lat temu (Grotzinger i in. 1995; Hagadorn, Waggoner 2000), a więc wskazujące na pogranicze prekambriu i kambriu. Znaczyłoby to, że ostateczne ich wymarcie, wbrew powszechnym opiniom o ich wyginięciu przed granicą z kambrem, najprawdopodobniej nastąpiło we wczesnym kambrze (Hagadorn, Fedo, Waggoner 2000).

Fauna z Ediacara

Stanowi ją unikalny zespół faunistyczny, który z wyjątkiem kilku form aglutynujących⁷³ i prowadzących biomineralizację (np. *Cloudina*, *Archaeichnum*, *Namacalathus*), wyróżnia się brakiem twardych elementów szkieletowych. Przy liczным występowaniu – do dzisiaj opisano 10 tys. osobników – fauna ta charakteryzuje się małym zróżnicowaniem gatunkowym (naukowe podstawy ma tylko 220 gatunków) i wolnym tempem radiacji.

⁷² Pierwszym paleontologicznie opisanym gatunkiem był meduzopodobny organizm *Aspidella terranovica* Billings, znaleziony w 1872 r. na Nowej Fundlandii. Gatunek ten za przedstawiciela fauny ediakarańskiej w nowoczesnym rozumieniu został uznany przez Gehlinga, Narbonne’a i Andersona w roku 2000.

⁷³ Formy takie mają pancerzyki zbudowane ze zlepionych, za pomocą wydzielanej substancji organicznej, ziarenek piasku lub innego dostępnego materiału znajdującego się na dnie. We współczesnym świecie do organizmów aglutynujących należą m.in. otwornice i larwy niektórych owadów (np. chrzączek), które oprócz piasku w swoje pancerzyki mogą wbudowywać również drobne muszelki innych organizmów.

Gąbki, których z racji swej prostej budowy spodziewano się znaleźć najwięcej, są reprezentowane w najstarszych zbiorowiskach tylko przez dwa taksony: *Palaeophragmodictya* (Gehling, Rigby 1996) i *Ausia* (Fedonkin 1996), znane z odcisków igieł. W porównaniu ze współczesnymi jamochłonami, które obejmują dwa z 35 powszechnie znanych typów zwierząt, wcześnieńi przedstawiciele form meduzopodobnych (np. *Brooksella*, *Cyclomedusa*, *Kullingia*) stanowią mniej niż 0,01% całkowitej gatunkowej różnorodności. Biorąc pod uwagę fakt, że są badacze uważający niektóre skamieniałości pierwotnie określone jako odciski meduz za odciski dysków bazalnych Petaloname, ich liczba będzie jeszcze mniejsza.

Najobficie reprezentowana grupa to organizmy dwubocznie symetryczne, należące do pierścienic i mięczaków (np. *Kimberella*, *Spriggina*) oraz wiele innych, wykazujących niezwykłą segmentację i symetrię, niemających odpowiedników we współczesnym świecie, jak na przykład trójpromienne *Tribrachidium*. Rozwój nauki sprawia, że i w przypadku tych grup zwierząt zmianie ulegają poglądy na budowę i pozycję systematyczną niektórych taksonów. *Dickinsonia* odkryta przez Sprigga (1947) została początkowo zinterpretowana jako odcisk meduzy (Harrington, Moore 1956), później klasyfikowano ją między innymi jako wieloszczeta (Glaessner, Wade 1966), przyrównywano do koralowca z rodzaju *Fungia* (Valentine 1992), a także dopatrywano się w nim przodka strunowców (Dzik 2000). Od 1999 r. Dzik i Ivantsov ten rodzaj umieszczają w wendyjskim typie zwierząt – Dipleurozoa. Rozpoznanie takich struktur, jak: metameryczna budowa mięśni, gardziel, liczne jelita, owalne narządy (gonady?) sprawia, że traktowanie tych organizmów jako jamochłony, robaki czy stawonogi (Glaessner, Wade 1966; Wade 1968) staje się już trudne do obrony (Dzik, Ivantsov 2002).

Przedstawiciele fauny z Ediacara tradycyjnie należałoby zaliczyć do zwierząt bezszkieletowych, jeśli przyjąć, iż szkielet to na przykład mineralne struktury u koralowców czy pancerzyki stawonogów. Badacze mają jednak dowody na to, że niektóre formy wytwarzały elastyczne (chitynowe) lub sztywne (zmineralizowane) struktury organiczne zarówno wewnątrz (igły, skleryty), jak i na zewnątrz ciała (delikatne muszelki).

Szkielet zewnętrzny, podobny do osłonki niektórych współczesnych polipów, charakteryzował ediacarańskie: *Saarina* (Gnilovskaya 1996), *Calyptrina* (Sokolov 1997) i spokrewnione z nimi formy interpretowane jako robakokształtne zwierzęta. Takie same cechy przypisuje się smukłej, stożkowej i w nieznacznym stopniu zmineralizowanej *Cloudina* (Grant 1990) oraz podobnej do niej konularii *Vendoconularia* (Ivantsov, Fedonkin 2002). Jeszcze innym gatunkiem wendozoa, z zachowanym egzoszkieletem, jest *Conomedusites*, którego twardy, zewnętrzny szkielecik (teka) stanowi podparcie dla kielichowatego ciała zaopatrzonego na krawędzi w liczne parzydełka

(Glaessner 1971). Spośród szkieletowych organizmów tego okresu na uwagę zasługują jeszcze: *Andiva* (Fedonkin 2002) – dwuskorupkowe z elastycznym, chitynowym pancerzykiem, *Parvancorina*, *Vendomia* i *Onega* – ze sztywnym, grzbietowym karapaksem oraz kilka innych form podobnych do stawonogów, takich jak *Archaeaspis*. Występujący w najwyższej części neoproterozoiku rurkowaty *Sabellidites* ma już stosunkowo złożoną strukturę szkieletu (Ivantsov 1990), który przypomina rurki współczesnych serpulii.

Fedonkin (2003) uważa, że narodzinom tych zwierząt sprzyjały zimne wody cieplejszych okresów pomiędzy ostatnimi zlodowaceniami prekambriu, zawierające wysoką koncentrację rozpuszczonego w niej tlenu. Wskazuje na to zarówno charakter skał, jak i sama natura występujących w nich skamieniałości. Według Fedonkina (2003), środowiska i fauna z Ediacara, charakteryzują się wieloma cechami, które opisują dzisiejsze polarne ekosystemy, wyróżniające się m.in.: intensywną cyrkulacją wody, lepszym jej natlenieniem, wysoką koncentracją składników odżywczych, większą rozpuszczalnością gazów. Organizmy żyjące w takich warunkach, dzisiaj mniej zróżnicowane od tropikalnych, tworzą krótkie łańcuchy pokarmowe, w których występuje niski stosunek drapieżników do reszty organizmów. Wiąże się z tym mała śmiertelność spowodowana także: metabolizmem na niskim poziomie, wolnym tempem wzrostu, ale prowadzącym do dużych rozmiarów, niskim potencjałem rozrodczym, długą żywotnością, małym zagęszczeniem populacji i dominacją powiązanych form bentonicznych. Do tej listy cech należy dołączyć dominację bezszkieletowych form, a w przypadku organizmów z mineralnymi szkieletami trzeba podkreślić, iż charakteryzowały się one delikatniejszymi pancerzykami niż ich odpowiedniki ze stref cieplejszych.

Większość tych wyróżników można zidentyfikować w neoproterozoicznym zapisie kopalnym. Mowa tu o dużych, wręcz gigantycznych rozmiarach ciała, zwłaszcza w porównaniu z młodszą fauną znaną z najniższego kambru (tommotu). Poza tym występuje dominacja organizmów bezszkieletowych, w stanie kopalnym znanych niemal wyłącznie z odcisków. Zapis kopaliny wskazuje również na niskie zróżnicowanie biologiczne, przewagę bentonicznych form, mały udział drapieżników (brak śladów ugryzień, śladów regeneracji tkanek, wskazujących na aktywność drapieżców). Charakterystyczne są także bardzo krótkie łańcuchy troficzne oraz małe zróżnicowanie na poziomie gatunkowym. Fedonkin (2003) uważa również, że niewielki udział organizmów szkieletowych, z węglanową biomineralizacją, powodowały właśnie warunki środowiskowe. W zimnych basenach końca prekambriu biomineralizacja przebiegała równie powoli jak współcześnie.

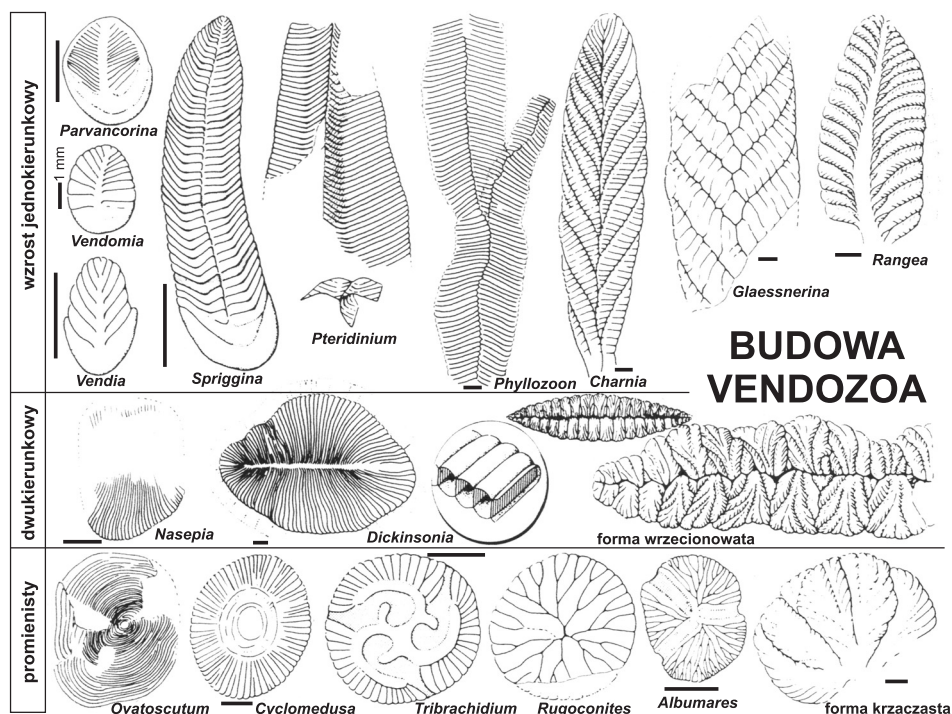
Zatem wiele wskazuje na to, że to zimny klimat okresu od 770,0 do 750,0 mln lat temu sprzyjał rozwojowi tych dużych eukariotycznych hetero-

trofów, dostarczając im unikalnej możliwości zasiedlenia nowych i rozległych, płytkowodnych siedlisk, między innymi poprzez usunięcie środowisk z temperaturami optymalnymi dla Procaryota.

Niestety, jak to zwykle w nauce bywa, wszelkie odkrywane zdarzenia wzbudzają kontrowersje. Zdaniem zdecydowanej większości badaczy tkankowa natura tych zwierząt jest niepodważalna. Jednak znakomity badacz kambryjskich śladów życia - Adolf Seilacher - prezentuje w tym względzie radykalnie odmienną interpretację faktów. W licznych publikacjach z lat 80. ubiegłego wieku uczony ów dokonywał reinterpretacji znalezisk fauny ediacarańskiej. W przeciwieństwie do koncepcji wysuwanych przez Glaessnera (1959) oraz Glaessnera i Wade'a (1966) uważa on, że organizmy najwyższego prekambriu reprezentują alternatywny świat, niemający nic wspólnego z wczesnymi przedstawicielami współczesnych jamochłonów, pierścienic czy stawonogów. Seilacher nie uznaje także podejścia Fedonkina (2003), który zalicza faunę Ediacara do różnych klas organizmów symetrycznych. W pracy z 1989 r. uważa wręcz, że wendozoa to duże organizmy jednokomórkowe (syncytialne, tj. wielojądrowe, powstałe ze zlania się licznych komórek). Twierdzi przy tym, że fauna ta stanowi „nieudany eksperyment ewolucyjny”, a organizmów ją tworzących nie należy w żaden sposób wiązać ze współczesnymi formami życia, gdyż ich podobieństwo do zwierząt współczesnych jest całkowicie przypadkowe, wynikające z konwergencji⁷⁴. Z tych to względów w 1992 r. dla tej fauny wyróżnił on nowe królestwo „Vendobionta”, które z uwagi na unikalne plany budowy podzielił na trzy grupy organizmów: promieniste, dwubiegunowe i jednobiegunowe (ryc. 21).

Zdaniem Seilachera (1989), wendozoa, w przeważającej większości znajdowane w postaci odcisków, pierwotnie nie były takie płaskie. Według tego autora wszystkie te organizmy, z wyjątkiem gąbek z Nowej Fundlandii, budową przypominały pikowany, dmuchany materac (powiększony fragment na ryc. 21) z możliwie cienką i elastyczną błoną zewnętrzną oraz bardziej sztywnymi przegrodami wewnętrznymi wzdłuż komór (Seilacher 1989). Jako że formy te funkcjonowały bez narządów wewnętrznych, to pobieranie składników odżywczych, oddychanie, wydalanie musiało zachodzić poprzez całą powierzchnię ciała, z czym zgadza się również Fedonkin (2003). Ten zaś nie wyklucza, że formy mające otwór gębowy mogły prowadzić nawet drapieżny tryb życia, a brak śladów ugryzień i znaków regeneracji wynika ze sposobu odżywiania się tych nieposiadających zębów zwierząt. Otóż duże, pojedyncze polipy (*Nemiana*, *Bonata*), meduzy z parzydełkami

⁷⁴ Upodabnianie się do siebie przedstawicieli różnych grup systematycznych, wywołane życiem w podobnych warunkach środowiskowych, np. opływowy kształt ryb i ssaków morskich.



Ryc. 21. Podział wendozoa ze względu na budowę morfologiczną (wg Seilachera 1989)

i obszerną jamą gastralną (*Ediacaria*, *Hiemalora*), a także inne formy prowadzące aktywne drapieżnictwo w całości połykały swoje ofiary, to jest mniejsze organizmy i larwy większych. Podobnie czyni większość współczesnych drapieżnych bezkręgowców (parzydełkowce, żebroplawy, płazińce). One również nie pozostawiają na swoich ofiarach żadnych śladów drapieżnictwa. Seilacher (1989) nie wyklucza, że procesy życiowe wspomagały fotosyntetyzujące glony lub chemosyntetyzujące bakterie, żyjące z tymi organizmami w symbiozie. Wzrost osobników przebiegałby więc nie tylko poprzez proporcjonalne zwiększanie rozmiarów komórek, ale również poprzez przyrastanie od zewnątrz nowych, dzielonych następnie na rozrastające się jednokomórkowe segmenty. W praktyce mogło to prowadzić do osiągania przez osobniki znacznych rozmiarów, oczywiście takich, na jakie pozwalały warunki fizyczne środowiska i sposób życia. Inne, większe formy, jak *Pteridium Simple* znane z Namibii, osiągały tak duże rozmiary prawdopodobnie dlatego, że żyły zanurzone w osadzie (Grazhdankin, Seilacher 2002). Wyklucza się natomiast możliwość, iż zwierzęta te prowadziły płożący tryb życia, po-

nieważ jednakowo wykształcone powierzchnie ich ciał nie wskazują na taką strategię życia.

Z nastaniem kambru niemal cała jednostka systematyczna, Vendobionta, wymarła. Zdaniem wszystkich (bez wyjątku) badaczy fauny schyłku prekambru za przypuszczalny powód wyginięcia tego świetnie prosperującego świata organicznego uznaje się pojawienie nowej grupy zwierząt. Choć jej przedstawiciele byli wielokrotnie mniejsi od swoich poprzedników, to mając zaopatrzone w zęby szczęki, nie miały sobie równych wśród bezbronnej, w większości prowadzącej osiadły tryb życia fauny ediacarańskiej, dla której stały się istnymi pogromcami. Tym samym rozpoczęły one nowy rozdział historii świata żywego – erę organizmów prowadzących swoisty „wyścig zbrojeń”. Wynajdując coraz to nowsze strategie zdobywania pokarmu, które pociągały za sobą udoskonalanie form ataku, zwierzęta te wymuszały u swych potencjalnych ofiar szukanie nowych form obrony. I... tak jest do dzisiaj.

BIBLIOGRAFIA

- ABELSON P.H. 1966. *Chemical events on the primitive earth*. Proceedings of the Nat. Acad. of Sc., 55: 1365–1372.
- ALLERS T., MEVARECH M. 2005. *Archaeal genetics – the third way*. Nat. Rev. Genet., 6(1): 58–73.
- ALTMANN R. VON. 1890. *Die Elementarorganismen und ihre Beziehungen zu den Zellen*. Veit&comp, Leipzig, 145 s.
- ANDERSSON S.G.E. 1998. *The genome sequence of Rickettsia prowazekii and the origin of mitochondria*. Natur., 396(6707): 133–140.
- ARBER W. 1993. *Evolution of prokaryotic genomes*. Genetics, 135: 49–56.
- ARBER W. 2002. *Molecular evolution: comparison of natural and engineered genetic variations. The Challenges of Science*. The Pontifical Acad. of Sc., 103: 90–101.
- ARRHENIUS S. 1908. *Worlds in the Making: The Evolution of the Universe*. Harper&Row, New York, 244 s.
- AVERY O.T. 1943. <<http://profiles.nlm.nih.gov/ps/retrieve/Narrative/CC/p-nid/157/p-docs/true>>.
- AVERY O.T., MACLEOD C.M., MCCARTY M. 1944. *Studies on the chemical nature of the substance inducing transformation of pneumococcal types*. J. Exp. Med., 79: 137–158.
- AYALA F.J., RZHETSKY A., AYALA F.J. 1998. *Origin of the metazoan phyla: molecular clocks confirm paleontological estimates*. Proceedings of the Nat. Acad. of Sc. USA, 95: 606–611.
- BAILEY J. 2000. *Chirality and the origin of life*. Act. Astronautica, 46: 627–631.
- BARTEL D.P., SZOSTAK J.W. 1993. *Isolation of new ribozymes from a large pool of random sequences*. Sc., 261: 1411–1418.
- BENNER S.A., CARACO M.D., THOMSON J.M., GAUCHER E.A. 2002. *Planetary biology: paleontological, geological, and molecular histories of life*. Sc., 296: 864–868.
- BENNER S.A., CARRIGAN M.A., RICARDO A., FREY F. 2006. *Setting the stage: The History, Chemistry and Geobiology behind RNA*, [w:] *The RNA World*, R.F. Gesteland, T.R. Cech, J.F. Atkins (red.). Third edition. Cold Spring Harbor Laboratory Press, Nowy Jork.
- BENNER S.A., COHEN M.A., GONNET G.H. 1993. *Empirical and structural models for insertions and deletions in the divergent evolution of proteins*. J. Molecular Biol., 229: 1065–1082.
- BENNER S.A., ELLINGTON A.D., TAUER A. 1989. *Modern metabolism as a palimpsest of the RNA world*. Proc. Nat. Acad. Sc. USA, 86: 7054–7058.
- BERGSLAND K.J., HASELKORN R. 1991. *Evolutionary Relationship among the Eubacteria, Cyanobacteria and Chloroplasts: Evidence from the rpoC1 Gene of Anabaena sp. Strain PCC 7120*. J. of Bacteriol., 173(11): 3446–3455.
- BERKNER L.V., MARSHALL L.C. 1965. *On the origin and rise of oxygen in the Earth's atmosphere*. J. Atmosph. Sc., 22: 225–261.

- BERKNER L.V., MARSHALL L.C. 1966. *Limitation on Oxygen Concentration in a Primitive Planetary Atmosphere*. J. of the Atmosph. Sc., 23(2): 133–143.
- BHATTACHARYA D., MEDLIN L. 1998. *Algal Phylogeny and the Origin of Land Plants*. Plant Physiol., 116: 9–15.
- BIRNBAUM D.T., KOSMALA J.D., BRANNON-PEPPAS L. 2000. *Optimization of preparation techniques for poly(lactic acid-co-glycolic acid) nanoparticles*. J. Nanoparticle Res., 2: 173–181.
- BLANCHETTE M., KENT W.J., RIEMER C., ELNITSKI L., SMIT A.F.A., ROSKIN K.M., BAERTSCH R., ROSENBLOOM K., CLAWSON H., GREEN E.D. I IN. 2004. *Aligning multiple genomic sequences with the threaded blockset aligner*. Genome Res., 14: 708–715.
- BRASIER M.D., GREEN O.R., JEPHCOAT A.P., KLEPPE A.K., VAN KRANENDONK M.J., LINDSAY J.F., STEELE A., GRASSINEAU N.V. 2002. *Questioning the evidence for Earth's oldest fossils*. Nature, 416: 76–81.
- BRASIER M.D., GREEN O.R., LINDSAY J.F., MCLOUGHLIN N., STEELE A., STOAKES C. 2005. *Critical testing of Earth's oldest putative fossil assemblage from the ~ 3.5 Ga Apex chert, Chinaman Creek, Western Australia*. Precambrian Res., 140: 55–102.
- BRASIER M.D., MCLOUGHLIN N., GREEN O.R., WACEY D. 2006. *A fresh look at the fossil evidence for early Archaean cellular life*. Philosophical Transactions of the Royal Soc. B, 361: 887–902.
- CAIRNS-SMITH A.G. 1985. *Seven Clues to the Origin of Life: a Scientific Detective Story*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- CALVIN M. 1969. *Chemical evolution: Molecular evolution towards the Origin of Living Systems on the Earth and Elsewhere*. Oxford Univ. Press, New York.
- CAVOSIE A.J., VALLEY J.W., WILDE S.A. 2005. *Magmatic $\delta^{18}\text{O}$ in 4400–3900 Ma detrital zircons: A record of the alteration and recycling of crust in the Early Archaean*. Earth and Planetary Sc. Letters, 235(3–4): 663–681.
- CECH T.R. 1983. *RNA splicing: three themes with variations*. Cell, 34: 713–716.
- CECH T.R. 1987. *The chemistry of self-splicing RNA and RNA enzymes*. Sc., 236: 1532–1539.
- CHAISSON E.J. 2005. *Ancient Fossils, Cosmic Evolution* [on-line]. Tufts Univ. [dostęp: 31.03.2006].
- CHARGAFF E. 1950. *Chemical specificity of nucleic acids and mechanism of their enzymatic degradation*. Experientia, 6(6): 201–209.
- CHARGAFF E. 1951. *Some recent studies on the composition and structure of nucleic acids*. J. Cell. Physiol. Suppl. 38 (Suppl).
- CHARGAFF E., LIPSHITZ R., GREEN C. 1952. *Composition of the deoxypentose nucleic acids of four genera of sea-urchin*. J. Biol. Chem., 195(1): 155–160.
- CHARGAFF E., LIPSHITZ R., GREEN C., HODES M.E. 1951. *The composition of the deoxyribonucleic acid of salmon sperm*. J. Biol. Chem., 192(1): 223–230.
- CHARGAFF E., VISCHER E., DONIGER R., GREEN C., MISANI F. 1949. *The composition of the desoxy-pentose nucleic acids of thymus and spleen*. J. Biol. Chem., 177: 405–416.
- CIARAMELLA M., NAPOLI A., ROSSI M. 2005. *Another extreme genome: how to live at pH 0*. Trends Microbiol., 13: 49–51.
- CLOUD P.E. JR, GRUNER J.W., HAGEN H. 1965. *Carbonaceous rocks of the Soudon Iron Formation (Early Precambrian)*. Sc., 148: 1713–1716.
- CRICK F.H.C. 1968. *The origin of the genetic code*. J. of Molecular Biol., 38: 367–379.
- DAVIES P. 2005. *A quantum recipe for life*. Nature, 437: 819.
- DAWKINS R. 1996. *Ślepy zegarmistrz*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- DE DUVE C. 1988. *Did God make RNA?* Nature, 336: 209–210.
- DE MARAIS D.J. 2000. *Evolution: When Did Photosynthesis Emerge on Earth?* Sc., 289: 1724–1730.
- DOOLITTLE W.F. 2000. *Uprooting the Tree of Life*. Sc. Amer., 2000(2): 90–95.

- DOOLITTLE R.F., FENG D.F., TSANG S., CHO G., LITTLE E. 1996a. *Determining divergence times of the major kingdoms of living organisms with a protein clock*. Sc., 271: 470–477.
- DOOLITTLE R.F., FENG D.F., TSANG S., CHO G., LITTLE E. 1996b. *Dating the Cenacester of organisms*. Sc., 274: 1751–1753.
- DYSON F. 1985. *Origins of Life*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- DZIK J. 1992. *Dzieje życia na Ziemi*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- DZIK J. 1997. *Ewolucja życia*, [w:] *Wielka encyklopedia geografii świata*, t. VIII. Wyd. Kurpisz, Poznań.
- DZIK J. 2000. *The Origin of the Mineral Skeleton in Chordates*. *Evolutionary Biol.*, 31: 105–154.
- DZIK J., IVANTSOV A. YU. 1999. *An asymmetric segmented organism from the Vendian of Russia and the status of the Dipleurozoa*. *Hist. Biol.*, 13: 255–268.
- DZIK J., IVANTSOV A. YU. 2002. *Internal anatomy of a new Precambrian dickinsoniid dipleurozoan from northern Russia*. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Monatshefte*, 2002: 385–396.
- EIGEN M. 1971. *Self organisation of matter and evolution of biological macromolecules*. *Die Naturwissenschaften*, 58: 465–523.
- EIGEN M., SCHUSTER P. 1979. *The Hypercycle: A principle of natural self-organization*. Springer, Berlin.
- ENGEL A.E., NAGY B., NAGY L.A., ENGEL C.G., KREMP G.O., DREW C.M. 1968. *Alga-like forms in onverwacht series, South Africa: oldest recognized lifelike forms on Earth*. Sc., 161: 1005–1008.
- ERTEM G., FERRIS J.P. 1996. *Synthesis of RNA oligomers on heterogeneous templates*. *Nature*, 379: 238–240.
- ESCHENMOSER A. 1997. *Towards a chemical etiology of nucleic acid structure*. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 27: 535–553.
- ESCHENMOSER A. 1999. *Chemical etiology of nucleic acid structure*. Sc., 284: 2118–2124.
- FEDONKIN M.A. 1996. *Ausia as an ancestor of archeocyathans, and other sponge-like organisms*, [w:] *Enigmatic Organisms in Phytoeny and Evolution*. Moscow, Paleontological Institute. Russian Acad. of Sc., 90–91.
- FEDONKIN M.A. 2002. *Andiva ivantsovi gen. et sp. n. and related carapace-bearing Ediacaran fossils from the Vendian of the Winter Coast, White Sea, Russia*. *Italian J. of Zool.*, 69(2): 175–181.
- FEDONKIN M.A. 2003. *The origin of the Metazoa in the light of the Proterozoic fossil record*. *Paleontological Res.*, 7(1): 9–41.
- FEDONKIN M.A., YOCHELSON E.L. 2002. *Middle Proterozoic (1.5 Ga) Horodyskia moniliformis Yochelson and Fedonkin, the Oldest Known Tissue-Grade Colonial Eucaryote*. *Smithsonian Contributions to Paleobiol.*, 94, 29 s.
- FELSENFELD G., MILES H.T. 1967. *The Physical and Chemical Properties of Nucleic Acids*. *Ann. Rev. of Biochemistry*, 36: 407–448.
- FENG Y., ABSHER D., EBERHART D.E., BROWN V., MALTER H.E., WARREN S.T. 1997. *FMRP associates with polyribosomes as an mRNP, and the I304N mutation of severe fragile X syndrome abolishes this association*. *Molecular Cell*, 1: 109–118.
- FORTEY R. 1999. *Life: A Natural History of the First Four Billion Years of Life on Earth*. Vintage Books, New York, 400 s.
- FOX S.W. 1959. *Biological overtones of the thermal theory of biochemical origins*. *Bull. Amer. Inst. Biol. Sc.*, 9: 20–23.
- FOX S.W. 1969. *Self-ordered Polymers and Propagative Cell-like Systems*. *Naturwissenschaften*, 56: 1–9.
- FOX S.W., HARADA K., KENDRICK J. 1959. *Production of spherules from synthetic proteinoid and hot water*. Sc., 129: 1221–1223.

- FOX S.W., KRAMPITZ G. 1964. *The catalytic decomposition of glucose in aqueous solution by thermal proteinoids*. *Nature*, 203: 1362–1364.
- FRENCH B.M. 1966. *Some geological implications of equilibrium between graphite and a C–H–O gas phase at high temperatures and pressures*. *Rev. of Geophys.*, 4: 223–253.
- FUJIWARA S. 2002. *Extremophiles: developments of their special function and potential resources*. *J. of Bioscience and Bioengineering*, 94: 518–525.
- FUTUYMA D.J. 2005. *On Darwin's Shoulders*. *Natural Hist.*, 114(9): 64–68.
- GALIMOV E.M., KUZNETSOVA N.G., PROKHOROV V.S. 1968. *On the problem of the old earth atmosphere composition in connection with results of isotopic analysis of carbon from Precambrian carbonates*. *Geokhimiya*, 11: 1376–1381 [po rosyjsku].
- GÁNTI T. 1971. *Az élet principuma* [Reguła życia]. Gondolat, Budapest.
- GÁNTI T. 1997. *Biogenesis itself*. *J. of Theoretical Biol.*, 187: 583–593.
- GAUCHER E., THOMSON J.M., BURGAN M.F., BENNER S.A. 2003. *Inferring the palaeoenvironment of ancient bacteria on the basis of resurrected proteins*. *Nature*, 425: 285–288.
- GAUDI B.S., BENNETT D.P., UDALSKI A., GOULD A., CHRISTIE G.W., MAOZ D., DONG S., MCCORMICK J., SZYMAŃSKI M.K., TRISTRAM P.J., NIKOLAEV S., PACZYŃSKI B., KUBIAK M., PIETRZYŃSKI G., SOSZYŃSKI I., SZEWCZYK O., ULACZYK K., WYRZYKOWSKI Ł., The OGLE Collaboration, DePoy D.L., Han C., Kaspi S., C.-U. Lee, F. Mallia, T. Natusch, R.W. Pogge, B.-G. Park, The μ FUN Collaboration, F. Abe, I.A. Bond, C.S. Botzler, A. Fukui, J.B. Hearnshaw, Y. Itow, K. Kamiya, A.V. Korpela, P.M. Kilmartin, W. Lin, K. Masuda, Y. Matsumura, M. Motomura, Y. Muraki, S. Nakamura, T. Okumura, K. Ohnishi, N.J. Rattenbury, T. Sako, To. Saito, S. Sato, L. Skuljan, D.J. Sullivan, T. Sumi, W.L. Sweatman, P.C.M. Yock, The MOA Collaboration, M.D. Albrow, A. Allan, J.-P. Beaulieu, M.J. Burgdorf, K.H. Cook, C. Coutures, M. Dominik, S. Dieters, P. Fouqué, J. Greenhill, K. Horne, I. Steele, Y. Tsapras, From the PLANET and RoboNet Collaborations, B. Chaboyer, A. Crocker, S. Frank, and B. Macintosh. 2008. *Discovery of a Jupiter/Saturn Analog with Gravitational Microlensing*. *Sc.*, 319(5865): 927–930.
- GEHLING J.G., NARBONNE G.M., ANDERSON M.M. 2000. *The first named Ediacaran body fossil, Aspidella terranovica*. *Palaeontol.*, 43: 427–456.
- GEHLING J.G., RIGBY J.K. 1996. *Long expected sponges from the Neoproterozoic Ediacara fauna of South Australia*. *J. of Paleontol.*, 70(2): 185–195.
- GILBERT W. 1986. *The RNA world*. *Nature*, 319: 618.
- GLAESSNER M.F. 1959. *Precambrian Colenterata from Australia, Africa and England*. *Nature*, 183: 1472–1473.
- GLAESSNER M.F. 1971. *Geographic distribution and time range of the Ediacaran Precambrian fauna*. *Geol. Soc. of Amer. Bull.*, 82: 509–514.
- GLAESSNER M.F., DAILY B. 1959. *The geology and Late Precambrian fauna of the Ediacara fossil reserve*. *Records of the South Australian Museum*, 13(3): 369–401.
- GLAESSNER M.F., WADE M. 1966. *The late Precambrian fossils from Ediacara, South Australia*. *Palaeontol.*, 9(4): 599–628.
- GNULOVSKAYA M.B. 1996. *Novye saarinidy Venda russkoj platformy*. *Doklady Akad. Nauk*, 348: 89–93.
- GNULOVSKAYA M. 1998. *The oldest annelidomorphs from the Upper Riphean of Timan*. *Doklady Akad. Nauk*, 359: 369–372.
- GNULOVSKAYA M., BECKER R., WEISS A., OLOVYASHNIKOV G., RABBEN M. 2000. *Pre-Ediacaran fauna of Timan (upper Riphean annelidomorphs)*. *Stratigraphy. Geol. Correlation*, 8(4): 11–39.
- GOGARTEN J.P., OLENDZENSKI E., HILARIO E., SIMON C., HOLSINGER K.E. 1996. *Dating the Cenacester of organisms*. *Sc.*, 274: 1750–1751.

- GRANT S.W.F. 1990. *Shell structure and distribution of Cloudina, a potential index fossil for the terminal Proterozoic*. Amer. J. of Sc., 290-A: 261–294.
- GRAZHDANKIN D., SEILACHER A. 2002. *Underground Vendobionta from Namibia*. Palaeontol., 45: 57–78.
- GREEN D.H., NICHOLLS I.A., VILJOEN M. J., VILJOEN R.P. 1975. *Experimental demonstration of the existence of peridotitic liquids in earliest Archean magmatism*. Geol., 3: 11–14.
- GROTZINGER J.P., BOWRING S., SAYLOR B.Z., KAUFMAN A.J. 1995. *Biostratigraphic and geochronologic constraints on early animal evolution*. Sc., 270: 598–604.
- GUERRIER-TAKADA C., GARDINER K., MARSH T., PACE N., ALTMAN S. 1983. *The RNA moiety of RNase P is the catalytic subunit of the enzyme*. Cell, 35: 849–857.
- HAGADORN J., FEDO M., WAGGONER B. 2000. *Ediacara-type biotas from the Cambrian of the Southwestern United States*. J. of Paleontol., 74: 731–740.
- HAGADORN J.W., WAGGONER B. 2000. *Ediacaran fossils from the southwestern Great Basin, United States*. J. of Paleontol., 74: 349–359.
- HAGGERTY L.S., MARTIN F.J., FITZPATRICK D.A., MCINERNEY J.O. 2009. *Gene and genome trees conflict at many levels*. Philosophical Transactions of the Royal Soc. B, 364: 2209–2219.
- HALDANE J.B.S. 1929. *The Origin of Life*. Rationalists Ann., 148: 3–10.
- HAN T.M., RUNNEGAR B. 1992. *Megascopic eukaryotic algae from the 2.1-billion-year old Negaunee Iron-Formation, Michigan*. Sc., 257: 232–235.
- HARRINGTON H.J., MOORE R.C. 1956. *Medusae incertae sedis and unrecognizable forms*, [w:] *Treatise on Invertebrate Palaeontology. Part F. Coelenterata*, R.C. Moore (red.), Univ. of Kansas Press, Lawrence, Kansas, and Geol. Soc. of Amer., Boulder, Colorado, 153–161.
- HASEGAWA M., FITCH W.M. 1996. *Dating the cenancestor of organisms*. Sc., 274: 1750–1750.
- HECKMAN D.S., GEISER D.M., EIDELL B.R., STAUFFER R.L., KARDOS N.L., HEDGES S.B. 2001. *Molecular evidence for the early colonization of land by fungi and plants*. Sc., 293: 1129–1133.
- HENNIG W. 1950. *Gründzüge einer Theorie der Phylogenetischen Systematik*. Deutscher Zentralverlag, Berlin.
- HOFFMAN P.F., SCHRAG D.P. 2000. *Ziemia jak kula śniegu*. Świat Nauki, 3(103): 70–77.
- HORODYSKI R.J. 1982. *Problematic Bedding-Plane Markings from the Middle Proterozoic Appekunny Argillite, Belt Supergroup, Northwestern Montana*. J. of Paleontol., 56: 882–889.
- IGAMBERDIEV A.U., LEA P.J. 2006. *Land plants equilibrate O₂ and CO₂ concentrations in the atmosphere*. Photosynthesis Res., 87(2): 177–194.
- ISAACS B., OLIVER J., SYKES L.R. 1968. *Seismology and the new global tectonics*. J. of Geophys. Res., 73: 5855–5899.
- IVANTSOV A.Y., FEDONKIN M.A. 2002. *Conulariid-like fossil from the Vendian of Russia: A metazoan clade across the Proterozoic/Palaeozoic boundary*. Palaeontol., 45(6): 1219–1229.
- JAMES J. 1970. *Miescher's discoveries of 1869. A centenary of nuclear chemistry*. The Journal of Histochemistry and Cytochemistry: official journal of the Histochemistry, Soc., 18(3): 217–219.
- JAVAUX E.J. 2006. *Extreme life on Earth – past, present and possibly beyond*. Res. Microbiol., 157: 37–48.
- JERMANN T.M., OPITZ J.G., STACKHOUSE J., BENNER S.A. 1995. *Reconstructing the evolutionary history of the artiodactyl ribonuclease superfamily*. Nature, 374: 57–59.
- JOHNS G.C., JOYCE G.F. 2005. *The promise and peril of continuous in vitro evolution*. J. of Molecular Evol., 61: 253–263.
- JOYCE G.F. 1987. *Nonenzymic template-directed synthesis of informational macromolecules*. Cold Spring Harbor Symposia Quantitative Biol., 52: 41–51.
- JOYCE G.F. 2002. *The antiquity of RNA-based evolution*. Nature, 418: 214–221.

- JOYCE G.F., ORGEL L.E. 1986a. *Non-enzymic template-directed synthesis on RNA random copolymers. Poly(C, G) templates*. J. of Molecular Biol., 188(3), 433–441.
- JOYCE G.F., ORGEL L.E. 1986b. *Non-enzymatic template-directed synthesis on RNA random copolymers: Poly(C, A) templates*. J. of Molecular Biol., 202(3): 677–681.
- JOYCE G.F., ORGEL L.E. 2006. *Progress toward Understanding the Origin of the RNA World*, [w:] *The RNA World*, R.F. Gesteland, T.R. Cech, J.F. Atkins (red.). Third edition. Cold Spring Harbor Laboratory Press, Nowy Jork.
- KAŹMIERCZAK J. 2011. <www.fnp.org.pl/files/ProfKazmierczak.pdf> [dostęp: 20.06.2011].
- KOONIN E.V. 2003. *Comparative genomics, minimal gene-sets and the last universal common ancestor*. Nat. Rev. Microbiol., 1: 127–136.
- KRUGER K., GRABOWSKI P.J., ZAUG A.J., SANDS J., GOTTSCHLING D.E., CECHE T.R. 1982. *Self-splicing RNA: autoexcision and autocyclization of the ribosomal RNA intervening sequence of Tetrahymena*. Cellular and Molecular Life Sc., 31: 147–157.
- LANIER W.P. 1989. *Interstitial and peloid microfossils from the 2.0 Ga Gunflint Formation: Implications for the paleoecology of the Gunflint Stromatolites*. Precambrian Res., 45(4): 291–318.
- LEHNINGER A.L. 1979. *Biochemia. Molekularne podstawy struktury i funkcji komórki*. PWRiL, Warszawa.
- LEU K., OBERMAYER B., RAJAMANI S., GERLAND U., CHEN I.A. 2011. *The prebiotic evolutionary advantage of transferring genetic information from RNA to DNA*. Nucleic Acids Res., 39(18): 8135–8147.
- MALCOLM B.A., WILSON K.P., MATTHEWS B.W., KIRSCH J.F., WILSON A.C. 1990. *Ancestral lysozymes reconstructed, neutrality tested, and thermostability linked to hydrocarbon packing*. Nature, 345: 86–88.
- MARGULIS L. 1970. *Origin of Eukaryotic Cells*, CT. Yale Univ. Press, New Haven.
- MEIERHENRICH U.J., NAHON L., ALCARAZ C., BREDEHÖFT J.H., HOFFMANN S.V., BARBIER B., BRACK A. 2005. *Asymmetrische Vakuum-UV-Photolyse der Aminosäure Leucin in fester Phase*. Angewandte Chem., 117(35): 5774–5779.
- MERESCHKOWSKY C. 1905. *Über Natur und Ursprung der Chromatophoren im Pflanzenreiche*. Biol. Centralbl., 25: 593–604.
- MILLER S.L. 1953. *Production of amino acids under possible primitive earth conditions*. Sc., 117(3046): 527–529.
- MILLER S.L., UREY H.C. 1959. *Organic Compound Synthesis on the Primitive Earth*. Sc., 130(3370): 245.
- MULLER H.J. 1929. *The Gene as the Basis of Life*. Proceedings of the International Congress of Plant Science, 1. Reprinted in Studies in Genetics: The Selected Papers of H.J. Muller, Bloomington, Ind., Univ. of Indiana Press (1962).
- MÜLLER U.F. 2006. *Re-creating an RNA world*. Cellular and Molecular Life Sc., 63: 1278–1293.
- NAGY L.A. 1974. *Transvaal Stromatolite: First Evidence for the Diversification of Cells about 2.2 × 10⁹ years ago*. Sc., 183: 514–516.
- NIECKUŁA E. 2009. *Kres ewolucji człowieka? Wprost*, 5(1360).
- NIELSEN P.E. 1993. *Peptide nucleic acid (PNA): a model structure for the primordial genetic material?* Res. Center for Medical Biotechnol., Dep. of Biochem. B, Dania.
- OPARIN A.I. 1924. *Proischozhdienije žyźni*. Moskovskij Raboczij, Moskwa, tenże, *The Origin of Life*, Macmillan, New York 1938.
- ORGEL L.E. 1968. *Evolution of the genetic apparatus*. J. of Molecular Biol., 38: 381–393.
- ORGEL L.E. 1992. *Molecular replication*. Nature, 358: 203–209.
- ORGEL L.E. 2004. *Prebiotic Chemistry and the Origin of the RNA World*. Crit. Rev. Biochem. Mol. Biol., 39: 99–123.

- ORÓ J. 1961. *Mechanism of synthesis of adenine from hydrogen cyanide under possible primitive earth conditions*. *Nature*, 191: 1193–1194.
- PACE E., STEFANI P. 2002. *Współczesny fundamentalizm religijny*. Wyd. WAM, Kraków.
- PAKCHUNG A.A.H., SIMPSON P.J.L., CODD R. 2006. *Life on Earth. Extremophiles continue to move the goal posts*. *Environ. Chem.*, 3: 77–93.
- PATTERSON C.C. 1956. *Age of meteorites and the Earth*. *Geochim. et Cosmochim. Act.*, 10: 230–237.
- PENNY D., POOLE A. 1999. *The nature of the last universal common ancestor*. *Current Opinions in Genetics and Development*, 9(6): 672–677.
- PORTER S.M., KNOLL A.H. 2000. *Testate amoebae in the Neoproterozoic Era: evidence from vase-shaped microfossils in the Chuar Group, Grand Canyon*. *Paleobiol.*, 26: 360–385.
- PRIGOGINE I. 1978. *Time, structure, and fluctuations*. *Sci.*, 201: 777–785.
- RASMUSSEN B. 2000. *Filamentous microfossils in a 3235-million-year-old volcanogenic massive sulphide deposit*. *Nature*, 405: 676–679.
- RAYMOND C. 2007. *Chemistry*. Ninth Edition. McGraw-Hill, New York, 1060 s.
- RETALLACK G.J. 2007. *Growth, decay and burial compaction of Dickinsonia, an iconic Ediacaran fossil*. *Alcheringa*, 31: 215–240.
- RONOV A.B. 1972. *Composition evolution in rocks and geochemical processes in the sedimentary shell of the Earth*. *Geochem. Internat.*, 9: 85–94.
- RUTTEN M.G. 1970. *The history of atmospheric oxygen*. *Space Life Sci.*, 2: 5–17.
- SAGAN L. 1967. *On the origin of mitosing cells*. *J. Theoretical Biol.*, 14(3): 255–274.
- SCHIDLÓWSKI M., EICHMANN R., JUNGE C.E. 1975. *Precambrian sedimentary carbonates: carbon and oxygen isotope geochemistry and implications for the terrestrial oxygen budget*. *Precambrian Res.*, 2: 1–69.
- SCHIMPER A.F.W. 1883. *Über die Entwicklung der Chlorophyllkörner und Farbkörper*. *Bot. Zeitung*, 41: 105–114, 121–131, 137–146, 153–162.
- SCHOPF J.W. 1993. *Microfossils of the Early Archean Apex Chert: New Evidence of the Antiquity of Life*. *Sci.*, 260: 640–646.
- SCHOPF J.W. 2002. *Kolebka życia. O narodzinach i najstarszych śladach życia na Ziemi*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- SCHOPF J.W., KVENOVOLDEN K.A., BARGHOORN E.S. 1968. *Amino acids in Precambrian sediments: An Assay*. *Proceedings of the Nat. Acad. of Sc. of the USA*, 59(2): 639–646.
- SCHOPF T.J.M. 1987. *Paleoceanografia*. PWN, Warszawa.
- SEILACHER A. 1989. *Vendozoa: Organismic constructoin in the Proterozoic biosphere*. *Lethaia*, 22: 229–239.
- SIGHINOLFI G.P. 1974. *Geochemistry of Early Precambrian Carbonate Rocks from the Brazilian Shield: Implications for Archean Carbonate Sedimentation*. *Contributions to Miner. and Petrol.*, 46(3): 189–200.
- SMUTS J.CH. 1926. *Holism and evolution*. Macmillan Co., New York.
- SOBCZYŃSKA D. 2001. *Nauka i filozofia o pochodzeniu życia*, [w:] *Zaproszenie do filozofii*, K. Łastowski, P. Zeidler (red.). Wyd. Humaniora, Poznań, 19–33.
- SOKOLOV B.S. 1997. *Essays on the Advent of the Vendian System*. KMK Sc. Press, Moscow, 156 s.
- SPRIGG R.C. 1947. *Early Cambrian(?) Jellyfishes from the Flinders Ranges, South Australia*. *Trans. Roy. Soc. S. Aust.*, 71: 212–224.
- STANLEY S.M. 2005. *Historia Ziemi*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- STACKHOUSE J., PRESNELL S.R., MCGEEHAN G.M., NAMBIAR K.P., BENNER S.A. 1990. *The ribonuclease from an ancient bovid ruminant*. *FEBS Lett.*, 262: 104–106.
- STOCKING C., GIFFORD E. 1959. *Incorporation of thymidine into chloroplasts of Spirogyra*. *Biochem. Biophys. Res. Comm.*, 1: 159–164.

- SUGITANI K., GREY K., ALLWOOD A., NAGAOKA T., MIMURA K., MINAMI M., MARSHALL C.P., VAN KRANENDOK M.J., WALTER M.R. 2007. *Diverse microstructures from Archaean chert from the Mount Goldsworthy-Mount Grant area, Pilbara Craton, Western Australia: Microfossils, duobiofossils, or pseudofossils?* *Precambrian Res.*, 158: 228–262.
- SZATHMARY E., GRIESEMER J. 2003. *The principles of life. Tibor Ganti*. Oxford Univ. Press, 220 s.
- SZOSTAK J.W. 1988. *Structure, and activity of ribozymes, Redesigning the Molecules of Life*. Benner S.A. ed., Heidelberg, 87–114.
- TAMM C., SHAPIRO H.S., LIPSHITZ R., CHARGAFF E. 1953. *Distribution density of nucleotides within a deoxyribonucleic acid chain*. *J. Biol. Chem.*, 203: 673–688.
- TAYLOR H.P. JR. 1977. *Water/rock interaction and the origin of H₂O in granitic batholiths*. *J. of the Geol. Soc.*, 133: 509–558.
- TRENDALL A.F. 1966. *Carbon dioxide in the Precambrian atmosphere*. *Geochim. et Cosmochim. Act.*, 30(4): 435–437.
- TROJAN P. 1978. *Ekologia ogólna*. PWN, Warszawa, 418 s.
- TS' O P.O.P. 1974. *Basic Principles in Nucleic Acid Chemistry*, Vol. I. Acad. Press, New York.
- TURKIEWICZ M. 2006. *Drobnoustroje psychrofilne i ich biotechnologiczny potencjał*. *Kosmos, Probl. Nauk Biol.*, 4(273): 307–320.
- UREY H.C. 1959a. *Primitive planetary atmospheres and the origin of life*, [w:] *The origin of life on Earth*, A.I. Oparin, A.G. Pasynskii, A.E. Braunstein, T.E. Pavlovskaya (red.). Pergamon Press, London–New York–Paris–Los Angeles, 16–22.
- UREY H.C. 1959b. *The atmospheres of the planets*. *Handbuch der Physik*. Springer-Verlag, 52: 363–418.
- VALENTINE J. 1992. *Dickinsonia as a polypoid organism*. *Paleobiol.*, 18: 378–382.
- VEIZER J. 1976. *⁸⁷Sr/⁸⁶Sr evolution of seawater during geologic history and its significance as an index of crustal evolution*, [w:] *The early history of the Earth*, B.F. Windley (red.). John Wiley and Sons, New York, 569–578.
- VISSER C.M., KELLOGG R.M. 1978. *Biotin. Its place in evolution*. *J. Mol. Evol.*, 11: 171–178.
- WÄCHTERSCHÄUSER G. 2000. *Origin of life: Life as We Don't Know It*. *Sci.*, 289: 1307–1308.
- WADE M. 1968. *Preservation of soft-bodied animals in Precambrian sandstones at Ediacara, south Australia*. *Lethaia*, 1: 238–267.
- WADE M. 1971. *Bilateral Precambrian Chondrophores from the Ediacara Fauna, South Australia*. *Proceedings of the Royal Soc. of Victoria*, 84(1): 183–188.
- WADE M. 1972. *Dickinsonia: polychaete worms from the Late Precambrian Ediacara Fauna, South Australia*. *Memoirs of the Queensland Museum*, 6(2): 171–190.
- WALD G. 1964. *The origins of life*. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 52: 595–611.
- WALKER J.C.G. 1977. *Evolution of the atmosphere*. Macmillan Publishing Co., New York, 318 s.
- WALLIN I.E. 1923. *The mitochondria problem*. *The Amer. Naturalist.*, 57(650): 255–261.
- WEGENER A. 1929. *The origin of continents and oceans* [przedruk wyd. 4, *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane*], Dover Publications, 1966, 246 s.
- WEINER A.M., MAIZELS N. 1987. *tRNA-like structures tag the 3' ends of genomic RNA molecules for replication: implications for the origin of protein synthesis*. *Proceedings of the Nat. Acad. of Sci. of the USA*, 84(21): 7383–7387.
- WERNER F. 2007. *Structure and function of archaeal RNA polymerases*. *Mol. Microbiol.*, 65(6): 1395–404.
- WILDE S.A., VALLEY J.W., PECK W.H., GRAHAM C.M. 2001. *Evidence from detrital zircons from the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago*. *Nature*, 409: 175–178.
- WOESE C.R. 1967. *The genetic code: The Molecular Basis for Gene Expression*. Harper and Row, New York, 179–195.

- WOESE C.R. 1994. *There must be a prokaryote somewhere: microbiology's search for itself*. Microbiol., 58(1): 1–9.
- WOESE C.R., GOGARTEN J.P. 1999. *When did eukaryotic cells evolve? What do we know about how they evolved from earlier life-forms?* Sc. Amer., październik.
- WOESE C.R., KANDLER O., WHEELIS M.L. 1990. *Towards a natural system of organisms: proposal for the domains Archaea, Bacteria and Eucarya*. Proceedings of the Nat. Acad. of Sc., 87(12): 4576–4579.
- WOOD V. I IN. 2002. *The genome sequence of Schizosaccharomyces pombe*. Nature, 415: 871–880.
- YOCHELSON E.L., FEDONKIN M.A. 2000. *A New Tissue-Grade Organism 1.5 Billion Years Old from Montana*. Proceedings of the Biol. Soc. of Washington, 113(3): 843–847.
- ZUILEN M.A. VAN, LEPLAND A., TERANES J., FINARELLI J., WAHLEN M., ARRHENIUS G. 2003. *Graphite and carbonates in the 3.8 Ga old Isua Supracrustal Belt, southern West Greenland*. Precambrian Res., 126(3–4): 331–348.